



**TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU**

**THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY**

**BETONARME YAPILARIN
GÜÇLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN FİBERLİ
POLİMERLER İÇİN ALTERNATİF ANKRAJ
METODLARI**

**104I008
(İÇTAG I-597)**

**Mühendislik Araştırma Gurubu
Engineering Research Grant Group**

**BETONARME YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİNDE
KULLANILAN FİBERLİ POLİMERLER İÇİN ALTERNATİF
ANKRAJ METODLARI**

PROJE NO: 104I008 (İÇTAG I-597)

DOÇ.DR. BARIŞ BİNİCİ

**KASIM 2006
ANKARA**

ÖNSÖZ

Ülkemizin pek çok önemli şehrinin deprem kuşağında bulunması ve bu bölgelerde yer alan yetersiz yapı stoğunun bir an önce güçlendirilme gereksinimi, yapı mühendisliği camiasında alternatif güçlendirme metotları bulunması çabalarını hızlandırmıştır. Bu bağlamda lifli polimerler (LPler) hafiflik, kolay uygulama, yüksek dayanım ağırlık oranları ile önemli bir alternatif teşkil ederek güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunun yanısıra 2006 yılı içerisinde uygulamaya giren “*Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*”te de LP uygulamalarına yer verilmektedir. Bu proje kapsamında yapı stoğumuzdaki detaylar göz önünde bulundurularak LP'lerin kenetlenme dayanımı deneysel ve analitik programlar çerçevesinde incelenmiştir. Ortaya çıkan bulguların yapı güçlendirmelerinde kullanılan LP'lerin tasarım uygulamalarında yapı mühendislerine yol gösterme niteliğinde olduğuna inanılmaktadır. Bu projede yürütülen çalışmaların tümü 104I008 (eski proje no: İÇTAG I-597) proje numarası altında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Araştırmacılar bu desteğe teşekkür etmektedir.

İÇİNDEKİLER

TABLolar LİSTESİ	5
ŞEKİLLER LİSTESİ	6
ÖZET	7
ABSTRACT	8
1. GİRİŞ	9
1.1 Problemin Tanımı	9
1.2 Literatür Taraması	11
1.2.1 DeneySEL Çalışmalar	11
1.2.2 Analitik Çalışmalar	12
1.3 Amaçlar ve Kapsam	15
2. LP-BETON KENETLENME DAYANIMI: DENEYSEL PROGRAM	16
2.1 Deney Düzenneği ve Yöntem	16
2.2 Malzemeler	16
2.3 KLP Uygulaması ve Detayları	19
2.4 Deney Elemanları	19
2.5 Deney Sonuçları	20
2.5.1 Dayanım ve Göçme Şekilleri	20
2.5.2 Şerit Tipi Ankarajlar	22
2.5.3 Gömme Tipi Ankarajlar	24
2.5.4 Fan Tipi Ankarajlar	24
2.5.5 Yük-Deplasman Karakteristikleri	25
2.6 Birim Uzama Ölçümleri	26
3. LP-BETON KENETLENME DAYANIMI: ANALİTİK MODEL	31
3.1 Şerit Tipi Ankarajlar	31
3.1.1 Model Parametrelerinin Kalibre Edilmesi	33
3.1.2 Modellen Deney Sonuçları ile Kıyaslanması	34
3.2 Gömme Tipi Ankarajlar	34
3.3 Fan Tipi Ankarajlar	37
4. LP İLE KİRİŞ GÜÇLENDİRMESİ: DENEYSEL PROGRAM	38
4.1 Deney Elemanları	38
4.2 Deney Düzenneği ve Ölçümler	40
4.3 Deney Sonuçları ve Gözlemler	40
4.3.1 Eleman R1	42
4.3.2 Eleman G1	43
4.3.3 Eleman G2	43
4.3.4 Eleman G3	43
4.4 Sonuçların İrdelenmesi	46
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
4.1 Çalışmadan Çıkan Sonuçlar	47
4.2 İleriye Yönelik Önerilen Potansiyel Araştırma Alanları	48
Ek-1	49
EK-2 Kaynaklar	50

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Şerit tipi ankaraj numunelerine ait detaylar ve test sonuçları	17
Tablo 2.2 G6mmme tipi ankaraj numunelerine ait detaylar ve test sonuçları	18
Tablo 2.3. Fan tipi ankaraj numunelerine ait detaylar ve test sonuçları	18
Tablo 3.1 Deplasman denklemi katsayıları	34
Tablo 3.2 Modelin diğeer deneyler ile karşılaştırılması	36
Tablo 3.3 Bu çalışmaya ait verilerin diğeer modellerin kapasite tahminleri ile kıyaslanması	37
Tablo 4.1 Deney Eleman Detayları	39

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 LP ile dolgu duvar güçlendirmesi	10
Şekil 1.2. Kiriş güçlendirmelerinde gözlenen göçme şekilleri	10
Şekil 2.1 Deney Düzeneği	16
Şekil 2.2. Ankaraj Çeşitleri	20
Şekil 2.3. Şerit tipi ankarajların normalize edilmiş dayanım-ankaraj boyu ilişkileri	21
Şekil 2.4. Gömme ankarajların normalize edilmiş dayanımları	21
Şekil 2.5. Fan tipi ankarajların normalize edilmiş dayanım-ankaraj boyu ilişkileri	22
Şekil 2.6. Göçme şekilleri	23
Şekil 2.7 Şerit, gömme ve fan ankarajlara ait yük-deplasman eğrileri	26
Şekil 2.8 Birim Uzama Ölçer Pozisyonları	27
Şekil 2.9 $L_{fp}=75$ mm için LP birim uzama profilleri	28
Şekil 2.10 $L_{fp}=125$ mm için LP birim uzama profilleri	28
Şekil 2.11 $L_{fp}=100$ mm için LP üzerine yapıştırılan birim uzama ölçerlerin konumları	28
Şekil 2.12 $L_{fp}=100$ mm için ortada boyuna yönde birim uzama profilleri	29
Şekil 2.13 $L_{fp}=100$ mm için dışta boyuna yönde birim uzama profilleri	29
Şekil 3.1 Sıvalı ve sıvasız numunelerin deplasmanları	33
Şekil 3.2 Modellerin gerilim-birim uzama ilişkileri	33
Şekil 3.3 Deneysel-hesaplanan kayma deformasyonları	35
Şekil 3.4 Şerit tipi ankarajların hesaplanan yük-test yükü ilişkileri	35
Şekil 3.5 Modelin literatürdeki veriler ile kıyaslanması	36
Şekil 4.1 Deney Kiriş Detayları	38
Şekil 4.2 Güçlendirilmiş Deney Elemanlarında LP Uygulama Esasları	39
Şekil 4.3 Deney elemanlarının hazırlanması	41
Şekil 4.4 LP ile güçlendirme ve ankrajların yerleştirilmesi	41
Şekil 4.5 Deney düzeneği	42
Şekil 4.6 Yük-yük altı deplasman grafikleri	44
Şekil 4.7 Yük-orta deplasman grafikleri	44
Şekil 4.8 Deney Esnasında Çekilen Numune Fotoları	45
Şekil 4.9 Çeşitli Modellere Göre Kapasitenin Tahmini	46

ÖZET

Lifli polimerler kullanılarak yapılan güçlendirme projelerinin tasarımında ankraj ya da kenetlenme dayanımının önemli bir rolü vardır. Bu çalışmada, beton veya tuğla elemanların sıvalı veya sıvasız yüzeylerine yapıştırılmış karbon lifli polimerlerin (KLP) kesme dayanımlarının incelendiği deneysel ve analitik programlar sunulmuştur. Yapılan çalışma kapsamında çift eksen çekme deney düzeneği kullanılarak değişik ankraj metotları denenmiştir. Deneyler neticesinde, yüzeyleri sıvalı beton veya yığma elemanlara yapıştırılan KLP'lerin dayanımlarının sıvasızlara göre düştüğü gözlemlenmiştir. Ek olarak tuğla elemanlara yapıştırılan KLP'lerin dayanımlarının betona yapıştırılanlara kıyasla çok düşük olduğu gözlenmiştir. Gömme tip ankrajlar, üzerlerine yapıştırıldıkları sıvalı veya sıvasız elemanların kesme dayanımlarını büyük oranda arttırdıkları saptanmıştır. Çalışma kapsamında tasarımda kullanılmaya yönelik bir ankraj dayanım modeli oluşturulmuştur. Düşük beton dayanımına sahip dört adet kiriş ankrajlı ve ankrajsız olarak LP ile güçlendirilmiş ve deneyler sonucunda literatürdeki ayrışma modellerinin göçme şeklini ve kapasiteyi tahmin etmedeki etkinlikleri tartışılmıştır. Deneysel programlar ışığında ülkemizde kullanılan LP güçlendirmeleri için bir dizi öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: beton, tuğla, lifli polimer, kenetlenme, ankraj dayanımı

ABSTRACT

In the design of an effective retrofitting solution using fiber reinforced polymers (FRPs), the anchorage capacity has an important role. This study presents an experimental study, in which different types of anchorage methods were tested in a double shear push-out test setup, to determine the strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete prisms and hollow clay tiles with and without plaster. It was observed that presence of a plaster finish adversely affects the strength of CFRPs bonded to concrete or masonry. Furthermore, it was found that strength of CFRPs bonded to hollow clay tiles are significantly lower than CFRPs bonded to concrete. The proposed embedded anchors significantly improved the ultimate strength of CFRPs both in the presence and absence of plaster finishing. A simple and effective strength model for use in FRP anchorage design is proposed and verified. The ability of existing debonding strength models to estimate strength and failure modes of FRP strengthened beams in flexure is discussed in light of experiments conducted on four RC beams. A number of recommendations regarding FRP design and application practice in Turkey are presented.

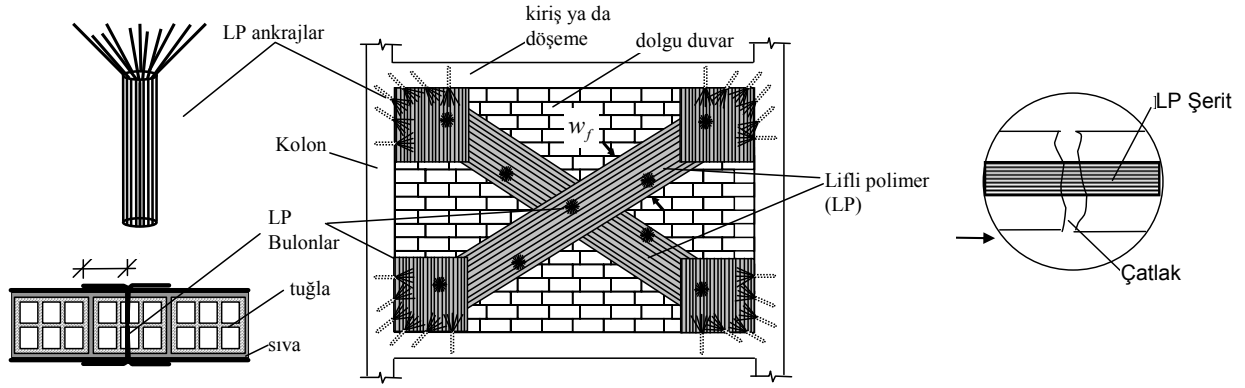
Keywords: concrete, masonry, fiber reinforced polymers, anchorage strength

1. GİRİŞ

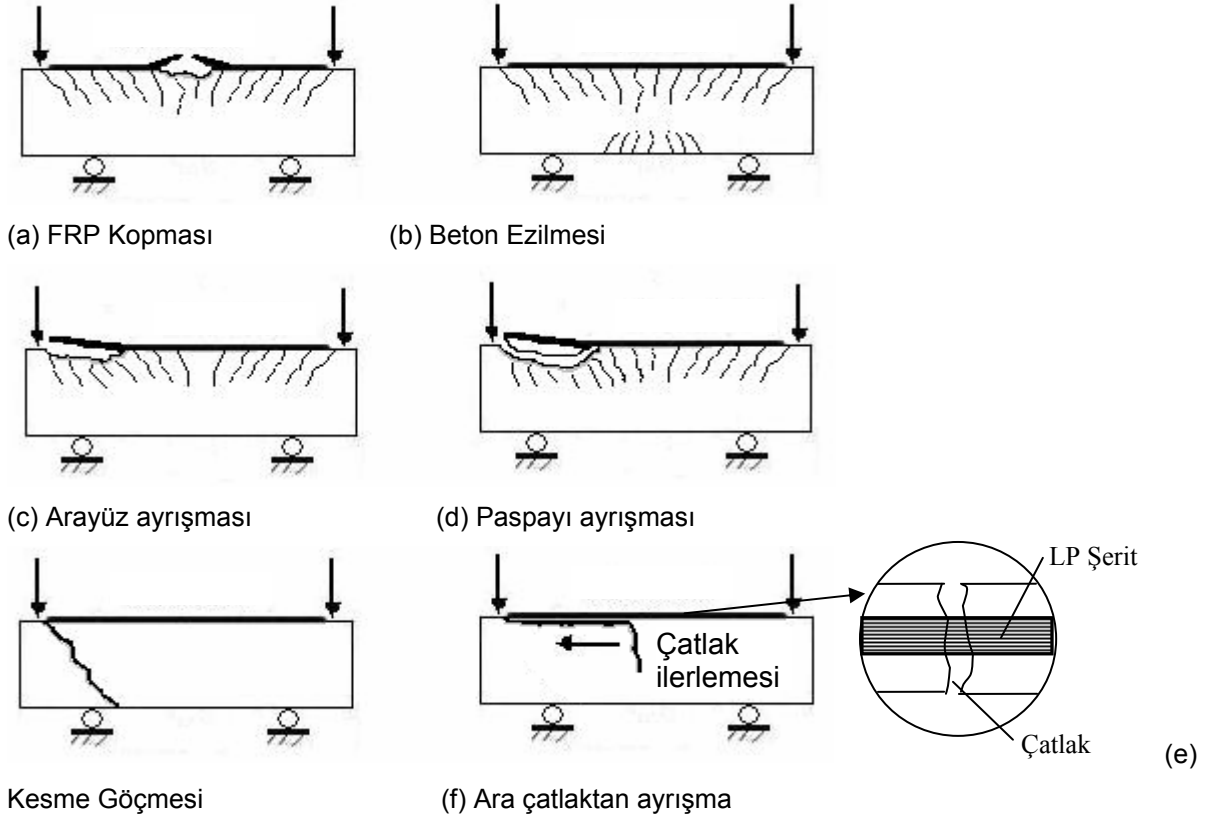
1.1 Problemin Tanımı

Ağırlıklı olarak savunma ve havacılık sanayilerinde kullanılan lifli polimerler (LP), artan üretim kapasitesi ve düşen maliyet fiyatları nedeniyle 90'lı yıllardan bu yana inşaat sektöründe de yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. LP'ler ülkemizde de sismik ve sismik olmayan güçlendirme projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, LP güçlendirme tasarım kurallarının 2006 Türk Deprem Şartnamesi'ne (2006) girmesi ile birlikte ülkemizde ilerleyen yıllarda LP ile güçlendirme uygulamalarında bir artış beklenmektedir. Ülkemizde LP kullanımdaki, polimerlerin hafiflik, yüksek dayanım ve kullanım kolaylığı gibi özellikleri sayesinde, artışa rağmen, daha başarılı ve sağlıklı uygulamalar için bazı aplikasyon parametrelerinin incelenmesi gereklidir. Örneğin yığma tuğla duvarlar ve üzerine uygulanan sıva Akdeniz havzası ülkelerinde inşaat sektörünün yaygın olarak tercih edilmektedir. Dolgu duvarların LP ile güçlendirilmesi Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde yürütülen araştırmalarının sonucunda elde edilen bulgular ışığında TDŞ'de yer almıştır. Bu güçlendirme yönteminde LP şeritler sıvalı dolgu duvar yüzeyine yapıştırılmakta ve dolgu duvarların bina yatay yük taşıma kapasitesine katkı sağlamaları hedeflenmektedir (Şekil 1.1). Araştırmalarda elde edilen önemli bulgulardan bir tanesi LP'nin doğru detaylandırılmadığı ve yüzey ankrajları ile tutturulmadığı durumlarda sıva yüzeyinden ayrıştığıdır. Bu sebeple LP-tuğla, LP-sıva ve LP-beton ayrışma kapasitelerinin doğru olarak tespiti ve buna göre tasarlanması gerekmektedir.

Kırk yılı aşan bir süreden beri çelik plakalar kullanarak kirişlerde eğilme güçlendirilmesi yapılması fikri mevcuttur. Çelik plakaların yerleştirilmesindeki yüksek işçilik maliyetleri ve düşük dayanım ağırlık oranları, bu uygulamayı dezavantajlı konuma getirmiştir. Buna karşın hafif, yüksek dayanımlı ve işçilik masrafı oldukça düşük olan LPler bu uygulama için de cazip alternatif teşkil etmektedir. Şekil 1.2'de LP ile güçlendirilmiş kirişlerin göçme şekilleri verilmektedir. Görüldüğü üzere LP kopması ve beton ezilmesi dışındaki tüm göçme şekilleri LP-beton arayüzünde ayrışmadan ötürü meydana gelmektedir. LP'nin birtakım önemli uygulama alanları yukarıda kısaca verilmiştir. Buna göre, LP-beton/tuğla arayüz kenetlenme davranışının anlaşılması LP uygulamalarının doğru yapılabilmesi için bir ön şart olarak görülmelidir. Özellikle LP'nin tasarlanmasının ve kullanımının henüz yeni yaygınlaşmaya başladığı Türkiye gibi ülkelerde detaylı ülke yapım pratiğini yansıtan deneysel programlar sonucunda ortaya çıkacak bulgulara büyük ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1.1 LP ile dolgu duvar güçlendirmesi



Şekil 1.2. Kiriş güçlendirmelerinde gözlenen göçme şekilleri

1.2 Literatür Taraması

İnşaat uygulamalarında LPlere olan ilginin artması dolayısı ile konu ile ilgili pek çok araştırma projesi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde konu başlığına ilişkin birtakım önemli araştırmalara değinilecektir. Yapılan çalışmalar deneysel ve analitik olmak üzere iki alt başlık altında sunulurken aşağıda verilmektedir.

1.2.1 Deneysel Çalışmalar

Chajes (1993) 1 LP-beton ara yüzündeki gerilme aktarılmasını çalışmak üzere tek yön kesme deneyi yapmıştır. Çalışmada LP yapıştırma öncesi yüzey hazırlama, yapıştırıcı tipi, beton dayanımı deney parametreleri olarak alınmıştır. Deney sonuçları ışığında pürüzlü bir beton yüzeyi bulundurulmasının arayüz kayma dayanımına katkıda bulunacağı belirtilmiştir.

Taljsten (1997) bir dizi tek yön kesme deneyi yaparak çelik plaka ve LP şeritlerin ankraj uzunluklarının beton üzerinde kenetlenme dayanımlarını incelemiştir. Deneysel bulgular çelik ve LP için ankraj uzunluklarının oldukça değişebildiğini göstermiştir. Birim uzama ölçümlerinden çıkan sonuçlara göre betondaki kritik birim şekil değiştirme değerleri ankrajın kapasitesini belirleyen en önemli faktördür. Elastik kapalı çözümler kullanılarak arayüzdeki gerilmeler deneysel verilerle karşılaştırılmış ve göçme anında iki grup değer arasında büyük farklar olduğu gözlemlenmiştir.

Yao (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada Taljsten'e (1997) benzer bir deney düzeneği deplasman kontrollü olarak kullanılmıştır. Deneylerin yürütülmesindeki ana amaç daha evvel Cheng ve Teng (2001) tarafından önerilen kenetlenme modelinin gerçekleşmesidir. Yapıştırma (ankraj) uzunluğu, beton dayanımı, LP beton genişlik oranı incelenen deney parametreleri arasındadır. Elde edilen sonuçlara göre Chen ve Teng (2001) tarafından önerilen model güvenli yönde dayanım tahminleri sağlamaktadır. Belirtmelidir ki, Chen ve Teng (2001) tarafından önerilen model sunulan bu çalışmadaki deney sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Dai (1997) tarafından yürütülen benzer tek yönlü kesme deneylerinde yapıştırıcının kayma rijitliğinin azaltılmasının ankraj taşıma kapasitesinin artırdığı yönde bir sonuç elde edilmiştir. Ayrıca ankraj uzunluğunun artırılmasının ankraj yük ve deformasyon kapasitesini artırdığına işaret edilmiştir.

Binici ve Bayrak (2004) tarafından bir dizi çift yönlü kesme deneyi yapılarak tek tip karbon LPlerin beton silindir ve prizmalar üzerindeki kenetlenme dayanımı ortaya çıkarılmıştır. Taşıma kapasitesinin yanında deplasman kapasitesi ve birim şekil değiştirme profilleri verilerek yük taşıma mekanizması hakkında bilgi edinilmiştir. Ortaya konulan analitik model ile yapılan deneylerdeki ankraj kapasitesinin tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Buna karşın etkin LP kullanımı için doğru ankrajlamının önemi vurgulanmıştır.

De Lorenzis (2001) kiriş eğilme deneyleri gerçekleştirilerek arayüzün eğilme ve kesme altındaki ayrışma mekanizmasını incelemiştir. Ankraj boyu, boyut etkisi, LP rijitliği ve genişliği incelenen deney parametreleri arasındadır. Araştırmancının ürünü olarak kiriş güçlendirmelerinde ayrışma kapasitesini tahmin edebilmek için tasarıma yönelik bir model ortaya konmuştur.

Özdemir (2005) tarafından yürütülen çalışmalarda LP çekme çıkarma deneyleri yapılarak gömülü LP dubellerin çekme kapasiteleri belirlenmiştir. Deneylerde beton dayanımı, dubel gömme derinliği, LP miktarı, dubel çapı deney parametreleri olarak alınmıştır.

Kobayashi (2000) kanat duvarlarda ve kolon sargısı kavuşmadığında ankraj olarak kullanabilmek için fan ankraj sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen fan ankrajların çekme yükünü rahatlıkla taşıyabildiği belirtilmiştir. Ancak kullanılan LP tipi saçak şeklinde olup ter yönde fiberlerle tutturulmadığından sistemin fan ankrajlarda çalıştığı belirtilmelidir.

1.2.2 Analitik Çalışmalar

Analitik çalışmalar kenetleme dayanımını belirlemek veya arayüz-kayma ilişkisini modelleyebilmek için iki grupta yoğunlaşmıştır. Dai (2005) tarafından geliştirilen non-lineer kenetlenme gerilmesi-kayma deplasmanı modeli ikinci tip analitik çalışmalara en önemli örnektir. Bu model kullanılarak detaylı sonlu eleman modellerinde arayüz ilişkisini modellemek mümkün olabilmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar tasarım açısından pek bir ehemmiyet taşımamaktadır.

Nabaka (2001) deneysel çalışmalar sonucunda birim uzama ölçerlerden elde ettiği verileri kullanarak başka bir nonlineer kenetlenme gerilmesi-kayma deplasmanı modeli oluşturmuştur. Bu model kullanılarak yapılan parametrik çalışmalar LP rijitliğinin davranışı önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermiştir.

Lu (2005) var olan nonlineer kenetlenme gerilmesi-kayma deplasmanı modellerini karşılaştırmış ve 253 deney sonucunu kullanarak daha iyi bir mode geliştirilmesi gerektiğini iddia etmiştir. Mezo ölçekli sonlu eleman modellemesi yardımı ile yeni bir nonlineer model ortaya koymuştur. Daha sonra model basitleştirilerek iki doğrudan oluşan bir hale getirilmiştir. İleriki bölümlerde gösterileceği gibi benzer iki doğrulu bir arayüz modeli kullanılarak tasarım için kullanılabilir bir model bu çalışma kapsamında geliştirilmiştir.

Kenetlenme kapasitesini tahmin edebilmek üzere bir takım teorik çalışmalar yapılarak “kenetlenme dayanım model” denebilecek bir grup model geliştirilmiştir. Bu modellerden önemli bazıları aşağıda verilmektedir.

Malek (1998) LP ile güçlendirilmiş kirişlerde LP levha ile beton paspayı arasındaki gerilmeler incelemiş ve elastik malzeme özellikleri kullanarak tasarıma yönelik kritik arayüz gerilmesine bağlı birtakım kurallar ortaya koymaya çalışmıştır. Ortaya konan sonuçlar LP ile güçlendirilmiş kirişlerin eğilme davranışı altında elastik davranışı ile sınırlıdır.

Brosens ve Van Gemert (1997) LP genişliğini de etkin parametre olarak ele alan bir kenetlenme dayanım modeli ortaya koymuşlardır. Bu modeli kendi deney sonuçları ile karşılaştırarak modelin tahmin ettiği dayanımları gerçeklemeye çalışmışlardır. Bu modelin en büyük eksiği deneylerde gözlemlenen etkin ankraj uzunluğu kavramını dikkate almaması ve çok uzun ankraj mesafeleri için güvensiz sonuçlar vermesidir.

Wu (2002) nonlinear gerilmesi-kayma deplasmanı modelleri kullanarak beton-LP arayüzündeki kayma gerilme dağılımlarını ve azami yük taşıma kapasitesini belirleyen kapalı çözüm sonuçları sunmuşlardır. Elde ettikleri çözümleri nonlinear sonlu eleman sonuçları ile karşılaştırarak çözümlerin doğruluğunu göstermişlerdir. Araştırmacılar çekme-çekme ve çekme itme LP-beton bağlantılarının gerilme dağılımlarının değişik olduğunu göstermişlerdir. Sundukları çözümler akademik açıdan oldukça önem taşısa da oldukça karışık ve iteratif denklem çözümleri gerektirdiğinden tasarımdan direk kullanıma olanağına sahip değildir.

Yuan (2004) geliştirdikleri analitik model yardımı ile kayma yükü altındaki LP-beton bağlantısının tüm yük-deplasman davranışını kapalı çözümlerle ile etmişlerdir. Yaptıkları parametrik çalışma sonuçlarına göre bağlantı tarafından taşınacak azami yük LP ankraj mesafesi ve LP rijitliğine bağlıdır. Önerilen modelin cazip tarafı tüm yük deplasman eğrisini çıkarmasına olanak vermesi dezavantajı ise tasarıma yönelik olmayışdır.

Maeda (1997) çift yön kesme deneyleri yaparak LP-beton kenetlenme kapasitesini tespit etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre 10mm'nin üzerindeki ankraj mesafeleri için kenetlenme kapasitesinde gözlenen artış ihmal edilebilecek düzeydedir. Araştırmacılar deney sonuçları ışığında azami kesme gerilmesi için aşağıdaki denklemi önermişlerdir:

$$\tau = 110.2 \cdot 10^{-6} t_p E_p \quad (1.1)$$

Burada t_p ve E_p LP'nin kalınlığı (mm) ve elastisite modülüdür (GPa). Ankraj kapasitesi P_u azami kesme gerilmesinin LP genişliği, b_p ve etkin LP uzunluğu, L_e , ile çarpılması sonucu bulunur. Burada etkin LP uzunluğu:

$$L_e = e^{6.13 - 0.58 \ln(t_p E_p)} \quad (1.2)$$

İleriki kısımlarda bu modelin deney sonuçları ile karşılaştırılması sunulacak ve performansı ortaya konacaktır.

Ueda (1999) deney sonuçlarını kullanarak LP-beton ankrajında azami kesme gerilmesi için aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$\tau = 0.19 t_p E_p \quad (1.3)$$

Deney sonuçlarına göre etkin ankraj uzunluğu için LP özelliklerinden ve beton dayanımından bağımsız 100 mm alınmasını önermişlerdir.

Neubauer ve Rostásy (1999) deney sonuçlarını inceleyerek LP-beton arayüz kırılma enerjisini, G_f , ortaya koymuşlardır:

$$G_f = k_p c_f f_{ct} \quad (1.4)$$

Burada f_{ct} beton çekme dayanımı, c_f ve k_p genişlik ve ikinci etkileri hesaba katmak için önerilen ampirik faktörlerdir. Bu sonuçları kullanarak ve Holzenkämpfer'in modelini (1994) kullanarak tasarıma yönelik ankraj kapasitesini hesaplamada kullanılacak şu modeli sunmuşlardır.

$$P_u = \begin{cases} 0.64 k_p b_p \sqrt{E_p t_p f_{ct}} & L \geq L_e \\ 0.64 k_p b_p \sqrt{E_p t_p f_{ct}} \frac{L}{L_e} \left(2 - \frac{L}{L_e} \right) & L < L_e \end{cases} \quad (1.5a)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2 f_{ct}}} \quad (15b)$$

Bu modelin deney sonuçları ile karşılaştırılması ileriki bölümlerde verilmektedir.

Chen ve Teng (2001) LP-beton ankraj dayanım modellerini inceleyerek kırılma mekaniği sonuçlarını da kullanarak yeni bir tasarım model ortaya koymuşlardır. Bu modelin etkin ankraj uzunluğunu ve ankraj dayanımını oldukça iyi bir şekilde ortaya koyduğunu öne sürmüşlerdir. Model aşağıdaki denklemlerden faydalanarak ankraj kapasitesi hesabında kullanılabilir.

$$P_u = 0.427 \beta_l \beta_w \sqrt{f_c} b_p L_{eff} \quad (1.6a)$$

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f_c}}} \quad (1.6b)$$

$$\beta_l = \begin{cases} 1 & \text{if } L \geq L_{eff} \\ \sin\left(\frac{\pi L}{2 L_{eff}}\right) & \text{if } L < L_{eff} \end{cases} \quad (1.6c)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / b_c}} \quad (1.6d)$$

Yukarıda b_c beton eleman genişliğidir. Bu model de deney sonuçlarının incelenmesinde kullanılacaktır.

Yukarıda özetlenen belli başlı çalışmalar, ankraj kapasitesinin pek çok belirsizlikten ötürü (KLP kalınlığı epoksi miktarı yüzey hazırlığı gibi) değişebileceğini göstermiştir. Bu nedenle güvenilir yeni tasarım modelleri oluşturulmasına yönelik çalışmalar halen sürmektedir. İleriki bölümlerde gözleneceği üzere

yukarıda verilen modeller tuğla LP bağlantıları için ve düşük dayanım betona sahip ve sıva ile kaplanmış yüzeylerin ankraj kapasitelerinin belirlenmesinde pek de iyi sonuçlar verememektedir. Bu sebeple deney sonuçları kullanılarak Türkiye şartlarında gerçekleştirilen güçlendirmelerde kullanılmak üzere yeni bir tasarım modeli sunulması da gerekmektedir.

1.3 Amaçlar ve Kapsam

Yukarıda kısaca özetlenen deneysel ve analitik çalışmalar yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan LP'lerin dayanımlarına ve ayrışma süreçlerine ait temel bilgileri içermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan geniş literatür taramaları düşük dayanımlı beton yüzeylere ve sıvalı yüzeylere yapıştırılmış LP plakaların dayanımlarına ve davranışlarına ait yeterli çalışma ve dolayısıyla bilgi olmadığını göstermiştir. Ek olarak, literatürde LP ile güçlendirilmiş yığma yapı bileşenleri dayanımlarının elde edilmesi amacı ile yapılan sistematik deneyler de bulunamamıştır.

Bu çalışmanın amacı:

- 1) Beton ve yığma yapı elemanlarına yapıştırılmış Karbon Lifli Polimer (KLP) plakalarının dayanımlarını ankraj tipi, sıva varlığı, KLP genişliği ve uzunluğu gibi parametreleri göz önüne alarak tahkik etmek,
- 2) Yüzeylere yapıştırılmış KLP plakaların dayanımlarını artırma potansiyeli olduğu düşünülen fan ve gömme tip ankarajları incelemek,
- 3) Türkiye şartlarına yönelik KLP güçlendirme tasarımlarında kullanılmak üzere KLP ayrışma kapasitesini belirlemek için tasarım denklemleri üretmek,
- 4) KLP dübel ve gömme ankarajların eğilme güçlendirmelerindeki performansını gözler önüne sermektir.

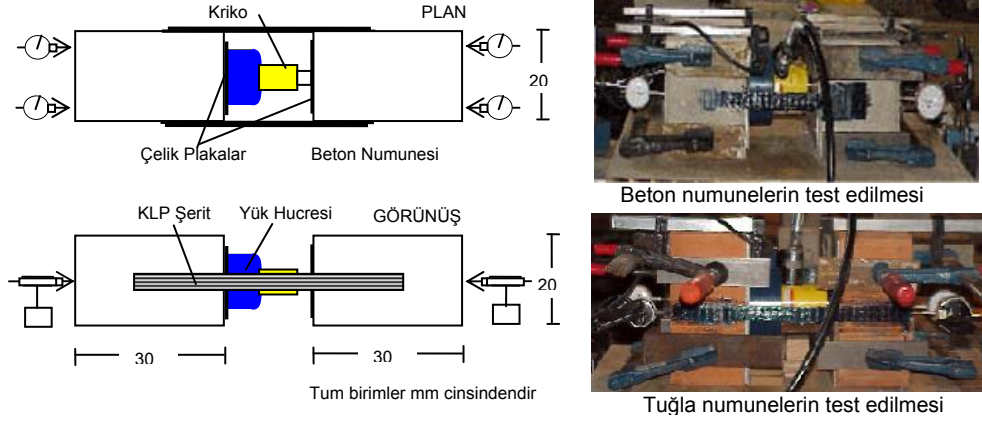
Bu amaca ulaşmak için iki kısımlı bir deney programı gerçekleştirilmiştir. Deney programını ilk kısmında çift yön kayma deneyleri gerçekleştirilerek beton-KLP arasındaki arayüz gerilmelerinin incelenmesi, ankraj kapasitesinin ortaya konması hedeflenmiştir. İkinci deney programında dört adet KLP ile eğilme güçlendirmesi yapılmış kiriş test edilmiştir. Deney verilerinden ulaşılan sonuçlar son bölümde irdelenmektedir.

2. LP-BETON KENETLENME DAYANIMI: DENEYSEL PROGRAM

2.1 Deney Düzeneği ve Yöntem

Beton yüzeylere yapıştırılan KLP plakaların dayanımının tayini için önceki çalışmalarda başarı ile kullanılan (Binici ve Bayrak, 2004; Dolan, 1998) basit bir deney düzeneğinden yararlanılmıştır. Deney düzeneğine ait görünüş ve planlar Şekil 2.1'de verilmiştir. Deney numuneleri, iki KLP plakasının benzer iki beton prizmasının veya taşıyıcı tuğlanın yanal yüzeylerine merkez eksen boyunca yatay olarak yapıştırılması sureti ile oluşturulmuştur. Yük, hidrolik bir krika yardımı ile beton veya tuğla birimlerin

merkezinine, blokları dışa itecek ve böylece KLP plaka ile blok ara yüzünde kesme gerilimleri yaratacak şekilde uygulanmıştır. Numunelerde kısmi göçmeyi engellemek ve gerilimi blok yüzeylerinde düzenli dağıtabilmek amacı ile blokların yükleme yüzeylerine 280 mm x 180 mm x 5 mm ölçülerinde iki adet çelik plaka yerleştirilmiştir. KLP plakalarında prematüre göçmeye neden olabilecek muhtemel dış merkezlilikleri önlemek amacı ile büyük bir özen gösterilmiştir. Veriler bilgisayar destekli veri toplama sistemi kullanılarak otomatik olarak toplanmıştır.



Şekil 2.1 Deney Düzeneği

2.2 Malzemeler

Deneyler sırasında düşük (10 MPa) ve normal (30 MPa) dayanımlı olmak üzere iki çeşit dayanıma sahip beton prizmalar kullanılmıştır. Deney numunelerine ait 28 günlük beton dayanımları Tablo 2.1, 2.2 ve 2.3'te her numune için verilmiştir. 280 mm x 180 mm x 130 mm boyutlarındaki taşıyıcı tuğlalar, kesitlerindeki delikler doğrultusunda tek eksenli basınç altında test edilmiş ve tek eksenli basınç dayanımları 6 MPa (tüm kesit alanı göz önüne alındığında) olarak elde edilmiştir. Deney programı boyunca KLP plakalar kullanılmıştır. Üretici firma 0.165 mm kalınlıklı KLP plakaların çekme dayanımı 3430 MPa ve göçme uzaması 0.015 mm/mm olarak beyan etmiştir. Epoksi ile KLP'in doyurulması sonucu oluşan yeni kompozit malzemenin tek eksenli çekme dayanımının elde edilebilmesi için çekme deneyleri yapılmış, 1 mm kalınlıklı KLP kompozit malzeme için 542 MPa tek eksenli çekme dayanımı ve 610000 MPa elastise modülü değerleri elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan çimento esaslı sıva üzerinde yapılan testler sonucunda, sıvanın tek eksenli basınç dayanımı 4.9 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.1. Şerit tipi ankaraj numunelerine ait detaylar ve test sonuçları

Test Numunesi	Blok Dayanımı f_u (MPa)	Blok Gen. b_c (mm)	KLP Gen. b_{frp} (mm)	KLP Yap. Boyu L_{frp} (mm)	Sıva Kalınlığı t_p (mm)	Sıva. Dayanımı f_p (MPa)	Göçme Yüğü P_{test} (kN)	Göçme Modu	$P_{test}/P_{frp}^{(a)}$
Grup 1									
LCS-1	10.6	200	25	75	-	-	3.88	ConDb ^(b)	0.27
LCS-2	10.6	200	25	100	-	-	4.66	ConDb	0.32
LCS-3	10.6	200	25	125	-	-	5.82	ConDb	0.40
LCS-4	10.6	200	25	150	-	-	5.17	ConDb	0.36
LCS-5	10.6	300	50	75	-	-	4.55	ConDb	0.16
LCS-6	10.6	300	50	100	-	-	8.10	ConDb	0.28
LCS-7	10.6	300	50	125	-	-	9.81	ConDb	0.34
LCS-8	10.6	300	50	150	-	-	9.65	ConDb	0.33
Grup 2									
NCS-1	31.0	200	25	50	-	-	4.35	ConDb	0.30
NCS-2	31.0	200	25	100	-	-	5.30	ConDb	0.37
NCS-3	31.0	200	25	125	-	-	4.58	ConDb	0.32
NCS-4	31.0	200	25	150	-	-	6.49	ConDb	0.45
NCS-5	31.0	300	50	50	-	-	7.27	ConDb	0.25
NCS-6	31.0	300	50	100	-	-	9.63	ConDb	0.33
NCS-7	31.0	300	50	125	-	-	12.45	ConDb	0.43
NCS-8	31.0	300	50	150	-	-	10.55	ConDb	0.37
Grup 3									
TS-1	6.0	280	25	50	-	-	2.84	TileDb ^(c)	0.20
TS-2	6.0	280	25	75	-	-	4.48	TileDb	0.31
TS-3	6.0	280	25	100	-	-	3.35	TileDb	0.23
TS-4	6.0	280	25	125	-	-	4.06	TileDb	0.28
TS-5	6.0	280	50	50	-	-	3.20	TileDb	0.11
TS-6	6.0	280	50	75	-	-	4.21	TileDb	0.15
TS-7	6.0	280	50	100	-	-	5.90	TileDb	0.20
TS-8	6.0	280	50	125	-	-	5.14	TileDb	0.18
Grup 4									
LCSP-1	10.6	200	25	75	13	4.53	1.53	IntDb ^(d)	0.11
LCSP-2	10.6	200	25	100	13	4.53	2.54	IntDb	0.18
LCSP-3	10.6	200	25	125	11	5.73	2.08	IntDb	0.14
LCSP-4	10.6	200	25	150	11	5.73	2.19	IntDb	0.15
Grup 5									
NCSP-1	31.0	200	25	50	12	4.53	1.07	IntDb	0.07
NCSP-2	31.0	200	25	100	11	5.39	2.04	PlaDb ^(e)	0.14
NCSP-3	31.0	200	25	125	11	5.39	1.93	IntDb	0.13
NCSP-4	31.0	200	25	150	11	5.73	1.26	PlaDb	0.09
Grup 6									
TSP-1	6.0	280	25	50	13	4.53	1.46	IntDb	0.10
TSP-2	6.0	280	25	75	13	4.53	1.99	IntDb	0.14
TSP-3	6.0	280	25	100	16	4.76	1.88	IntDb	0.13
TSP-4	6.0	280	25	125	15	4.53	2.69	PlaDb	0.19

a: Üretici firma tarafından verilen KLP dayanım verileri kullanılarak hesaplanmıştır

b: Betondan ayrışma

c: Tuğladan ayrışma

d: Sıva-yapıştırıcı yüzeyinde ayrışma, e: Sıvanın blok yüzeyinden ayrışması

Tablo 2.2 Gömme tipi ankaraj numunelerine ait detaylar ve test sonuçları

Test Numune si	Blok Day.	Blok Gen.	KLP Gen.	KLP Yap.	KLP Yap.	Sıva Kal.	Sıva Day.	Göçme Yüğü	Göçme Modu	$\frac{P_{test}}{P_{frp}^{(a)}}$
	f_c (MPa)	b_c (mm)	b_{frp} (mm)	Boyü L_{frp} (mm)	Der. d_{frp} (mm)	t_p (mm)	f_p (MPa)	P_{test} (kN)		
Grup 7										
LCE-1	17.8	200	25	50	25	-	-	7.91	FrpFail ^(b)	0.55
LCE-2	17.8	200	25	50	50	-	-	7.07	FrpFail	0.49
LCE-3	17.8	200	25	50	75	-	-	9.36	FrpFail	0.65
Grup 8										
NCE-1	29.8	200	25	50	25	-	-	8.45	FrpFail	0.59
NCE-2	29.8	200	25	50	50	-	-	8.20	FrpFail	0.57
NCE-3	29.8	200	25	50	75	-	-	6.14	FrpFail	0.43
Grup 9										
TE-1	6.0	280	25	120	130	-	-	6.89	FrpFail	0.48
TE-2	6.0	280	25	120	130	-	-	6.12	TileFail ^(c)	0.42
TE-3	6.0	280	25	120	130	-	-	5.56	TileFail	0.39
Grup 10										
LCEP-1	17.8	200	25	50	25	11	4.76	4.83	FrpFail	0.33
LCEP-2	17.8	200	25	50	50	11	4.76	5.67	FrpFail	0.39
NCEP-1	29.8	200	25	50	25	10	4.76	5.78	FrpFail	0.40
Grup 11										
TEP-1	6.0	280	25	120	130	13	4.76	4.46	TileFail	0.31
TEP-2	6.0	280	25	120	130	10	4.76	5.38	TileFail	0.37
TEP-3	6.0	280	25	120	130	14	4.76	4.14	TileFail	0.29

a: Üretici firma tarafından verilen KLP dayanım verileri kullanılarak hesaplanmıştır,.

b: KLP göçmesi,

c: Tuğla göçmesi

Tablo 2.3. Fan tipi ankaraj numunelerine ait detaylar ve test sonuçları

Test Numunesi	Blok Day.	Blok Gen.	KLP Gen.	KLP Yap.	Fan Açısı	Sıva Kal.	Sıva Day.	Göçme Yüğü	Göçme Modu	$\frac{P_{test}}{P_{frp}^{(a)}}$
	f_c (MPa)	b_c (mm)	b_{frp} (mm)	Boyü L_{frp} (mm)	α	t_p (mm)	f_p (MPa)	P_{test} (kN)		
Grup 12										
LCF-1	17.8	200	25	50	30°	-	-	4.60	FrpFail ^(b)	0.32
LCF-2	17.8	200	25	75	30°	-	-	5.33	FrpFail	0.37
LCF-3	17.8	200	25	100	30°	-	-	6.29	FrpFail	0.44
Grup 13										
LCF-4	17.8	200	25	50	60°	-	-	3.01	FrpFail	0.21
LCF-5	17.8	200	25	75	60°	-	-	4.71	FrpFail	0.33
LCF-6	17.8	200	25	100	60°	-	-	3.69	FrpFail	0.26

a: Üretici firma tarafından verilen KLP dayanım verileri kullanılarak hesaplanmıştır,

b: KLP göçmesi

2.3 KLP Uygulaması ve Detayları

KLP yapıştırılmasından önce sıvalı veya sıvasız beton ve tuğla yüzeyleri kompresör yardımıyla tozdan ve kirden arındırılmıştır. Daha sonra KLP plakaları önceden belirlenen genişlik ve uzunlukta kesilmiş, epoksiye bulanmış ve blok yan yüzlerine yapıştırılmıştır. KLP kompozit kürünü alana kadar yerçekimi nedeni ile yapıştırıldığı pozisyonundan kaymaması için plastik naylon ile kaplı tahta plakalar ve işkenceler yardımı ile kompozit üzerine bastırılmıştır. KLP'in donması ile birlikte ahşap parçalar çıkartılmış ve deney ekipmanı bloklar oynatılmadan ve KLP'e zarar verilmeden yerleştirilmiştir. Deney programındaki tüm deneyler için KLP yapıştırıldıktan sonra yeterli dayanıma ulaşması için üç gün beklenmiştir.

Test numunelerinde kullanılan üç çeşit KLP uygulaması Şekil 2.2'de verilmiştir. Şerit ankaraj deneylerinde KLP parçaları beton veya tuğla blokların yan yüzlerine epoksi sürülerek herhangi özel bir detay kullanılmadan doğrudan yapıştırılmıştır (Şekil 2.2a). Gömme tipi ankaraj deneylerinde beton ve tuğla bloklar için farklı detay ve yöntemler uygulanmıştır. Beton numunelerde KLP'in serbest ucu yüzeyde açılan dairesel kesitli bir deliğe gömülmüştür (Şekil 2.2b). Tuğla üzerinde yapılan deneylerde ise KLP'ler yardımıyla polimeri plakada başlaması olası ayrışmaya karşı bağlayıcı ve geciktirici bir etki sağlanması amaçlanmıştır. Tuğla numunelerde kullanılan bu dairesel kesitli KLP ankaraj bulonları, KLP plakalarının ince bir çelik tel yardımı ile yuvarlanması ve daha sonra epoksiye bulanması sureti ile hazırlanmıştır (Şekil 2.2c). Bu bulonlar daha sonra tuğla içinde açılan deliklerden geçirilmiş, uçları dairesel bir fan teşkil edecek şekilde açılarak alta mevcut olan KLP şeritler üzerine düzgün bir şekilde yapıştırılmıştır. Beton üzerindeki deneylerde gömme derinlikleri ve tuğla üzerindeki deneylerde ise bulon yerleri ve sayıları deney parametreleri olarak tayin edilmiştir. Şerit tipi ankarajlara benzeyen fan tipi ankarajların bu ankarajlardan tek farkı ise ankaraj uçlarının fan şeklinde açılarak yapıştırılmış olmasıdır. Böylece fan şeklindeki ankarajın kenetlenme dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2.4 Deney Elemanları

Deney programı dahilinde blok basınç dayanımı, yüzeydeki sıvanın etkisini, KLP kompozit genişliği ve uzunluğu ile ankaraj çeşidi parametrelerinin ankaraj kesme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile 57 adet çift eksen kesme deneyi yürütülmüştür. Bu deneylerden 39 adeti beton numuneler üzerinde yürütülürken kalanlar ise tuğla numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

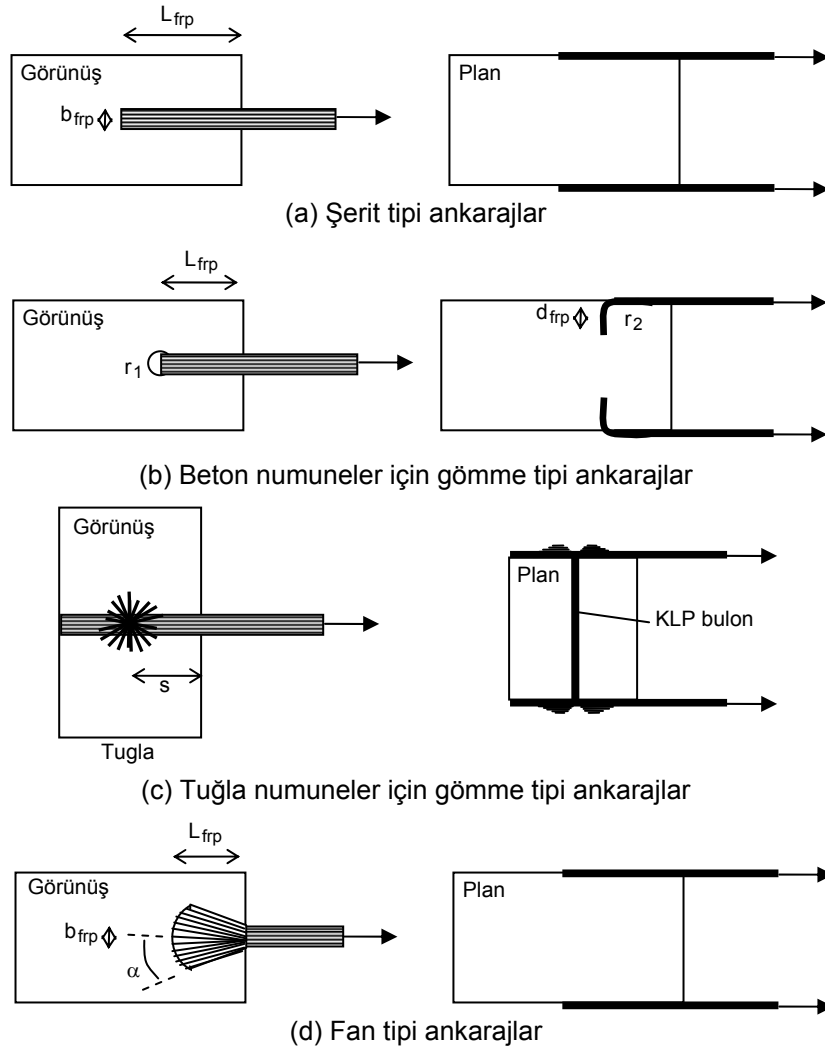
Deney numunelerinin ait detay ve özellikler Tablolar 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilmiştir. Grup 1'den Grup 6'ya kadar Tablo 2.1'de verilen numunelerde beton ve tuğla bloklar üzerine yapıştırılan şerit tipi KLP plakaları kullanılmıştır. 1., 2. ve 3. Gruplarda bulunan numunelerin yüzeylerine sıva uygulanmazken, 4., 5. ve 6. Gruplarda bulunan numunelerde ise KLP plakaları doğrudan sıvalı yüzeylere yapıştırılmıştır. Gömme tipi ankaraj deneyleri sırasında sıvalı ve sıvasız beton blok yüzeylerine yapıştırılan sabit genişlikli, değişken gömme ve yapıştırma boylarına sahip KLP plakalar kullanılmıştır (Tablo 2.2). Tuğla numuneler üzerindeki gömme ankaraj deneylerinde ise bir veya iki ankaraj bulonu kullanılmıştır. TE-1 ve TEP-1 numuneleri yükleme ucundan 60 mm uzaklıkta, TE-3 ve TEP-3 numuneleri ise 30 mm uzaklıkta birer adet bulon ile teşkil edilmiştir. TE-2 ve TEP-2 numuneleri ise yüklenen uçtan 40 ve 80 mm uzaklıkta yerleştirilen iki adet

ankaraj bulonu ile hazırlanmıştır. Fan tipi ankaraj deneyleri ise, üç farklı KLP yapıştırma boyu ve iki farklı fan yayılma açısı için iki ayrı grup (Grup 12 ve 13) altında yürütülmüştür (Tablo 2.3).

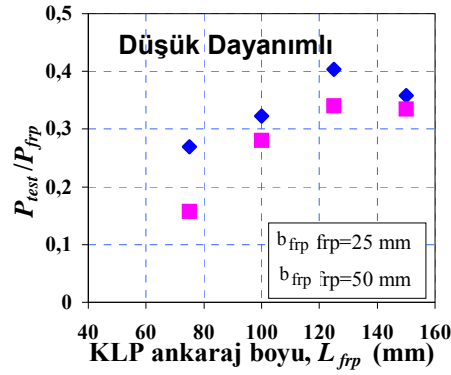
2.5 Deney Sonuçları

2.5.1 Dayanım ve Göçme Şekilleri

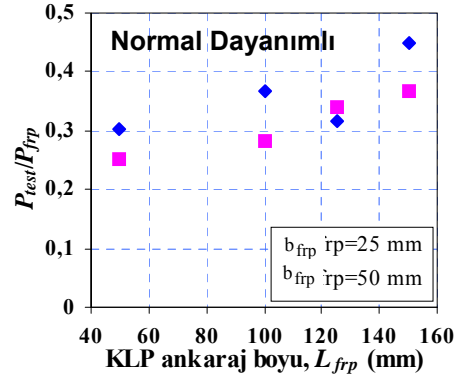
Numune detayları, deneysel dayanım ve LP çekme kapasitesine göre normalize edilmiş dayanım ve göçme şekillerini içeren deney sonuçları Tablolar 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilmiştir. Farklı yapıştırma boy/derinlikleri ve polimer genişlikleri için KLP dayanım varyasyonları her bir ankaraj çeşidi için Şekil 2.3, 2.4 ve 2.5 de verilmiştir.



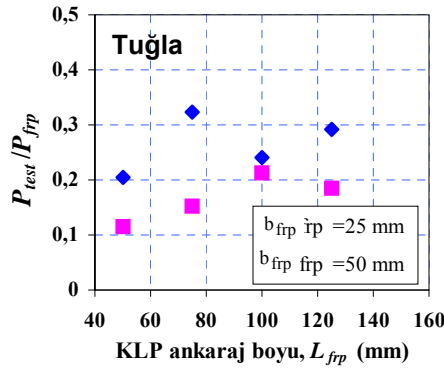
Şekil 2.2. Ankaraj Çeşitleri



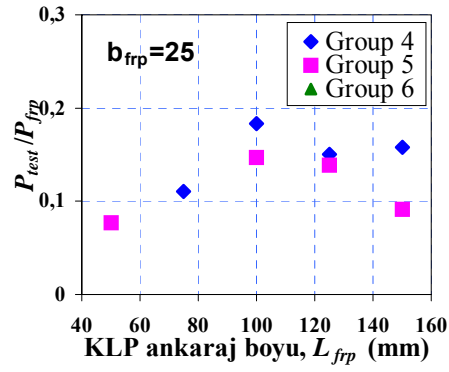
(a) Sıvasız Düşük Dayanımlı Beton



(b) Sıvasız normal dayanımlı beton

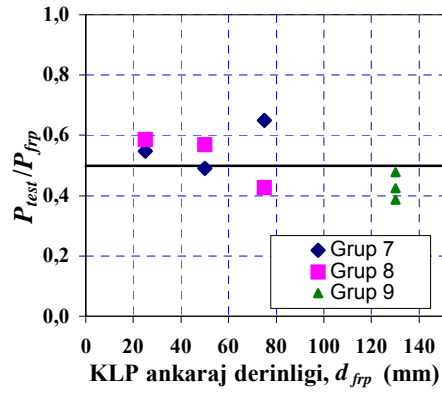


(c) Sıvasız tuğla

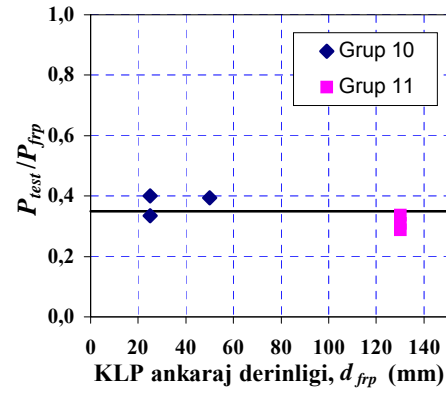


(d) Sıvalı numuneler

Şekil 2.3. Şerit tipi ankarajların normalize edilmiş dayanım-ankaraj boyu ilişkileri

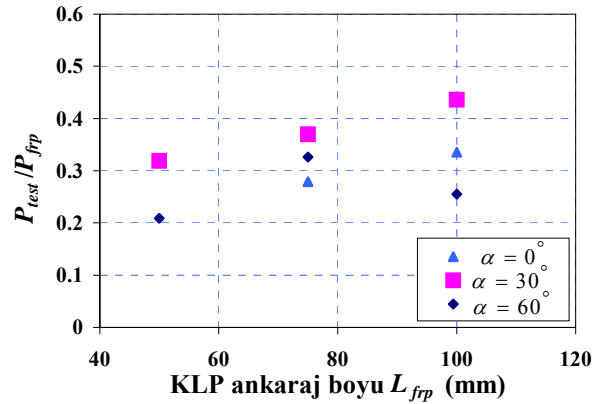


(a) Sıvasız numuneler



(b) Sıvalı numuneler

Şekil 2.4. Gömme ankarajların normalize edilmiş dayanımları



Şekil 2.5. Fan tipi ankarajların normalize edilmiş dayanım-ankaraj boyu ilişkileri

Şerit, gömme ve fan ankarajların farklı göçme şekillerine ait resimler Şekil 2.6`da verilmiştir. Tüm gruplara ait detay ve özellikler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

2.5.2 Şerit Tipi Ankarajlar

Grup 1 deneyleri (düşük dayanımlı beton düzenekler) sonuçlarına göre artan ankaraj boyu kesme dayanımını efektif boy (Chen ve Teng, 2001) olarak tanımlanan ve 10 MPa dayanımlı beton için yaklaşık olarak 100 mm olan ankaraj boyuna kadar arttırırken bu boydan sonra kesme yükündeki artış nerdeyse sabittir. Deneyler sonucunda 25 ve 50 mm genişlikli KFP ankarajlar için kesme dayanımı sırasıyla KLP yük dayanımının sırasıyla 40% ve 34% civarında gözlenmiştir. Düşük dayanımlı beton blok deneylerinin sonucunda KLP'in beton yüzeyinden ayrışması ile gevrek bir göçme meydana gelmiştir. Bu tip göçmede ayrışma beton yüzeyin altında yapıştırılan KLP'e yakın bir kesitte meydana gelmiş ve ince bir beton yüzeyi KLP'e yapışmış halde kalmıştır (Şekil 2.6a). Grup 2 deneyleri (normal dayanımlı beton) sonucunda düşük dayanımlı beton bloklarla yapılan deneylere benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ankaraj kesme dayanımı, Grup 1 deneylerine kıyasla 25 ve 50 mm KFP ankaraj genişliği için sırasıyla %13 ve %20 oranında artmıştır (Şekil 2.3a ve 2.3b).

Tuğlalar üzerinde yapılan şerit ankarajlı (Grup 3) deneyler sonucunda elde edilen kesme dayanımlarının benzer özelliklere sahip beton deneylerine kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu grup deneyleri içerisinde en büyük normalize edilmiş dayanım, %31 ile 25 mm genişliğe ve 75 mm yapıştırma boyuna sahip KLP yapıştırılmış numunede elde edilmiştir. Tuğla yüzeyi süreksizlikleri yüzünden çeşitlilik gösteren efektif ankaraj boyun, Şekil 2.3c'de verilen normalize edilmiş dayanım-KLP yapıştırma boyu ilişkisinden görülebileceği gibi 75 ile 100 mm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Grup 3 tuğla deneylerinin tümünde KLP'in beton yüzeyinden ayrışması ile gevrek bir göçme meydana gelmiştir (Şekil 2.6b). Düşük ankaraj kesme dayanımının ve yüzey ile sağlıklı ve tam bir yapışmanın oluşmamasının en önemli nedeni tuğla yüzeyinde bulunan süreksizlikler ve tuğlanın zayıf yapısıdır.



(a) Betondan ayrışma



(b) Tuğladan ayrışma



(c) Sıva-yapıştırıcı ayrışması



(d) Sıvanın ayrışması



(e) Sıvanın kısmi ayrışması



(f) Sıvanın kısmi ayrışması



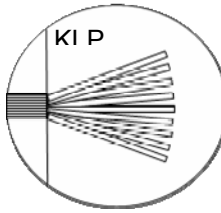
(g) KLP kopması (FRPFail)



(h) Tuğla göçmesi (TileFail)



(i) Fan tipi ankaraj göçmesi



Şekil 2.6. Göçme şekilleri

Grup 4, 5 ve 6 deneyleri ankaraj yüzeyinde bulunan ince sıva katmanının (~10 mm) ankaraj kesme dayanımını önemli bir ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Deneyler sonucunda ortalama olarak KLP yük dayanımının %10~20'si, bir başka deyişle sıvasız deneylerin %50'si civarında kenetlenme dayanımları

elde edilmiştir. Sıvanın yapıldığı yüzeylerin basınç dayanımlarının farklı olmasına rağmen, sıva basınç dayanımlarının benzer olması sebebiyle benzer dayanım değerlerinin gözlenmesine neden olmuştur. Deneyler sonucunda iki farklı göçme şekli gözlenmiştir. Bunlardan ilki KLP'in sıva yüzeyinden ayrışmasıdır ve buna ait tipik bir resim Şekil 2.6c'de verilmiştir. Bu göçme şeklinin görüldüğü deneylerde gözlenen ortalama kenetlenme dayanımı KLP tek eksenli çekme kapasitesinin %12'si civarındadır. İkinci göçme çeşidi olan sıvanın blok yüzeyinden ayrışması ise NCSP-2, NCSP-4 ve TSP-4 numunelerinde gözlenmiştir. Bu numunelere ait kenetlenme dayanımları ise KLP tek eksenli çekme kapasitesinin % 9 ile % 19 arasında değişmektedir. Şekil 2.6d'de verilen NCSP-4 deney numunesinde sıvanın tamamı yüzeyden ayrışırken, Şekil 2.6e ve 2.6f'de verilen NCSP-2 ve TSP-4 deney numunelerinde sıva ile blok ara yüzünde oluşan ayrışma nedeniyle sıvanın kısmi olarak ayrışması gözlenmiştir. Farklı göçme şekilleri gözlemlenmesine rağmen, sıvalı numune deneyleri sonuçlarına bakarak göçme şekillerinden bağımsız olarak benzer kenetlenme dayanımları elde edildiği belirtilebilir. Bu nedenle düşük dayanımlı bir malzeme sıva için kullanıldığında, göçme şekillerinden bağımsız olarak, benzer dayanım değerleri gözleneceği söylenebilir.

2.5.3 Gömme Tipi Ankarajlar

Grup 7 ve 8 deneyleri sonucunda (Tablo 2.2 ve Şekil 2.4) gömme ankaraj kesme dayanımının beton dayanımına ve gömme derinliğine bağlı olmadığı ve gömme ankarajlar kullanılarak KLP yük kapasitesinin %65'i oranında kesme dayanımı elde edilebildiği görülmüştür. Kesme dayanımında sağlanan tatmin edici artışa rağmen yine de KLP yük dayanımının tümü kullanılmamıştır. Tüm sıvalı ve sıvasız deneyler sonucunda gözlenen göçme, üzerindeki gerilme yığılmalarına bağlı olarak KLP kopması olmuştur (Şekil 2.6g ve 2.6h). Grup 10 deneyleri sıvalı beton bloklar için kesme dayanımının gömme ankaraj ile şerit ankaraja göre üç veya dört kat arttığını ama sıvasız gömme ankarajlı beton bloklara göre ise %30 azaldığı göstermiştir. Deneyler sonucunda blokların basınç dayanımlarının KLP bond dayanımını etkilemediği gözlenmiştir. Beton numunelerin deneyleri sırasında kullanılan üç farklı gömme derinliği, 25 mm'den daha derin ankarajlar için bond dayanımının önemli bir değişim göstermediğini ispatlamıştır.

KLP bulonlar ile güçlendirilmiş KLP plaklar yapıştırılmış tuğla numunelerinin deney sonuçlarından elde edilen dayanımlar gömme tip ankarajlı beton blokların dayanımları seviyelerinde olmuştur. Ayrıca çoklu KLP bulon kullanılarak yürütülen deneylerin sonuçları (TE-2 ve TEP-2), yakın mesafelerde konuşlandırılan çoklu bulonların dayanımlarının tek bulonla teşkil edilen numunelere kıyasla önemli bir farklılık göstermediğini ispatlamıştır. Grup 9 ve 11 bünyesinde bulunan TE-1 hariç tüm deneylerde göçme tuğlanın düşük dayanımına bağlı olarak tuğlanın kırılması şeklinde gerçekleşirken (Şekil 2.6h), TE-1 düzeneğinde göçme KLP kopması nedeni ile meydana gelmiştir. Uygulamada, gömme ankaraj ile güçlendirilecek yığma yapılarda deney düzeneğinde olduğu gibi tek sıra tuğla kullanılmayacağı için tuğla dayanımındaki artışa bağlı olarak tuğla kırılması şeklindeki göçme yerine KLP kopması beklemek yanlış olur.

2.5.4 Fan Tipi Ankarajlar

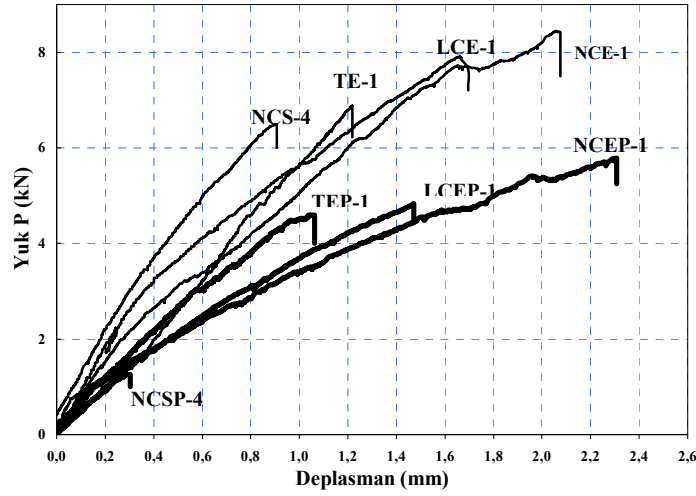
Son grup deneylerinde (Gruplar 12 ve 13) fan tipi ankarajlar kullanılarak, şerit tip ankarajlara göre artan ankaraj alanını sayesinde kenetlenme dayanımında artış sağlanmak amaçlanmıştır.

Fan ankaraj deneyleri sırasında düşük dayanımlı beton bloklar kullanılmıştır. Grup 12 ve 13 deneyleri sırası ile 30° ve 60° fan açısı için gerçekleştirilmiş, 30° ankaraj açısı için kesme dayanımında şerit ankarajla kıyaslandığında 15% artış sağlanmıştır. Ancak 60° fan açılı ankaraj deneylerinde kapasitede 30° ankaraj açısına sahip numunelere kıyasla 30%'luk bir düşüş gözlemlenmiştir. Artan fan açısı ile birlikte fan ağızlarında meydana gelen gerilme yığılmaları nedeniyle KLP'in prematüre kopması gözlenmiştir (Şekil 2.6i). Şekil 2.5 de verilen sonuçlar, 60° fan açısına sahip deney düzeneklerinde yapıştırma boyunun 75 mm'den 100 mm'ye çıkması sonucunda normalize edilmiş dayanımın düştüğünü göstermiştir. Bu düşüş yatay bağlayıcı fiberli KLP plakalardan kaynaklanmaktadır. Fan tipi ankarajların hazırlanması sırasında bu yatay fiberler dikkatlice kesilmiş, oluşan her bir KLP demeti fani oluşturacak şekilde yüzeye yapıştırılmıştır (Şekil 2.6i). Ama her bir fiberi tane tane ayırıp fan halinde yapıştırmak kullanılan KLP yapısından dolayı mümkün olmamıştır. Yapıştırma boyunun artmasıyla kesilen demetler arası boşluklar artmış, dolayısıyla gerilme aktarım kapasitesi düşmüştür. Sonuç olarak yatay fiberli KLP plakaların 30°'den daha büyük fan açıları için uygun olmadığı anlaşılmıştır. Yatay bağlantıları olmayan başka tip KLP'ler ile daha iyi sonuçlar veren fan tipi ankarajlar teşkil edilebileceği düşünülmektedir (Kobayashi, 2000).

2.5.5 Yük-Deplasman Karakteristikleri

Bu bölümde deneysel program boyunca yürütülen deneylere ait tipik yük-deplasman eğrileri irdelenmiştir (Şekil 2.7). Deneylere ait ölçümler yazılınca ankaraj deplasmanını değil, bloklar arasında kalan yapışmamış KLP ve çok küçükte olsa betonda oluşan kısalmaları da içermektedir. Ankarajlara ait deplasmanlar ise sonraki bölümde verilecek analitik modelde kullanılabilmesi amacıyla ölçümlerden elde edilen deplasmanlardan KLP'in elastik deplasmanının çıkarılması (beton deplasmanı ihmal edilerek) ile elde edilmiştir.

Önceden de söylendiği gibi deneysel program dahilindeki tüm yük-deplasman ilişkilerinde benzer davranışlar gözlenmiştir. Önceki çalışmalar (Wu 2002, Yuan 2004) genel yük-deplasman eğrilerinin lineer olmayan artan ve daha sonra sabit kanan iki kısımdan oluştuğunu ortaya koymuştur. Yapılan deneyler sonucunda, mikro-çatlaklar nedeni ile oluşan artan kısım tüm genel yük-deplasman eğrilerinde görülebilenken, KLP'in ayrışması sonucu meydana gelen sabit kısım ise gözlemlenememiştir. Bu kısmın gözlenmesi için gerekli olan deplasman kontrollü yükleme düzeneği, bu çalışmanın asıl amacının ankaraj dayanımının elde edilmesi olmasından ve gereken deplasman kontrol sisteminin zahmetli ve maliyetli olmasından dolayı tercih edilmemiştir.



Şekil 2.7 Şerit, gömme ve fan ankarajlara ait yük-deplasman eğrileri

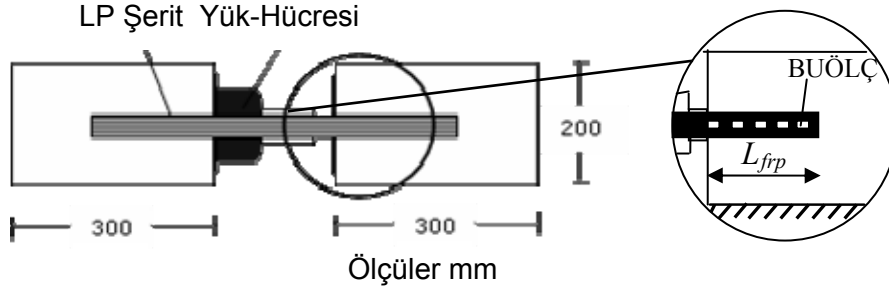
Şekil 2.7’de de görülebileceği gibi yapıştırma yüzeyinde bulunan sıva, NCSP-4 numunesinin deformasyon kapasitesini aynı özellikleri taşıyan sıvasız NCS-4 numunesine göre büyük oranda düşürmüştür. Aksine gömme tip ankarajlar ile test edilen sıvalı ve sıvasız numunelerde deplasman ve yük kapasiteleri benzerlik göstermiştir. Gömme ankaraj ile test edilen ve farklı tip basınç dayanımına sahip numunelerde benzer dayanımlar elde edilirken, artan basınç dayanımına paralel olarak deplasman kapasitelerinde artış gözlenmiştir. Sıvalı ve sıvasız numunelerin deplasman kapasitelerindeki benzerliklere rağmen, sıvalı numunelerin ankaraj dayanımlarının sıvasız numunelere kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçların temsili eşliğinde, sıvalı veya sıvasız beton ve tuğla deney numuneleri için gömme tipi ankarajlar kullanarak daha yüksek deplasman ve dayanım performansları yakalamanın mümkün olduğu anlaşılmıştır.

2.6 Birim Uzama Ölçümleri

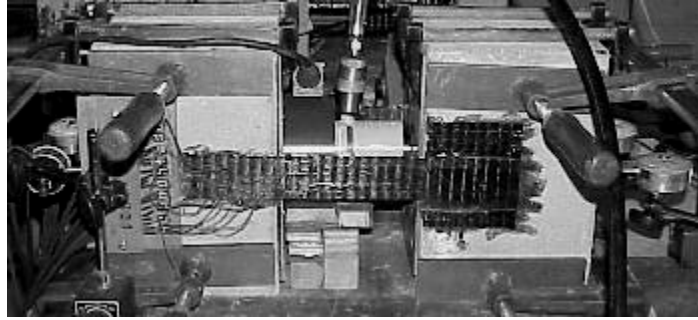
LP üzerindeki gerilme dağılımları ölçmek üzere üç değişik ankraj boyu için üzerine birim uzama ölçer yerleştirilmiş üç deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde ankraj uzunluğu $L_{fp} = 75, 100, \text{ ve } 125 \text{ mm}$ şerit genişliği ise $b_{fp} = 50 \text{ mm}$ olarak alınırken beton dayanımı 17.8 MPa ’dır. Bu numunelerin azami kesme kapasiteleri LP çekme kapasitelerinin sırasıyla % 24.2, 31.3, ve 29.7’si olarak elde edilmiştir.

Birim uzama ölçerlerin yerleri ve 125mm ankraj boyuna sahip olan birim uzama ölçer yapıştırılmış numunenin fotoğrafı Şekil 2.8’de verilmektedir. Tüm birim uzama ölçerler LP’nin lif doğrultusunda (yük aktarım yönünde) yapıştırılmıştır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da şerit boyunca ölçülen ölçülen birim uzama profilleri verilmektedir. Tüm mesafeler birim uzama ölçer merkezinden alınarak verilmektedir. Görüldüğü üzere yüklemenin ilk aşamalarında, oluşan azami birim uzamalar şerit başında gözlemlenirken, yük

arttıkça oluşan ayrışmadan dolayı azami birim uzama şerit başından uzaklaşarak bir anlamda uzama uyumu yaratmaktadır.



(a) Birim uzama ölçerlerin (BUÖLÇ) LP üzerindeki pozisyonları

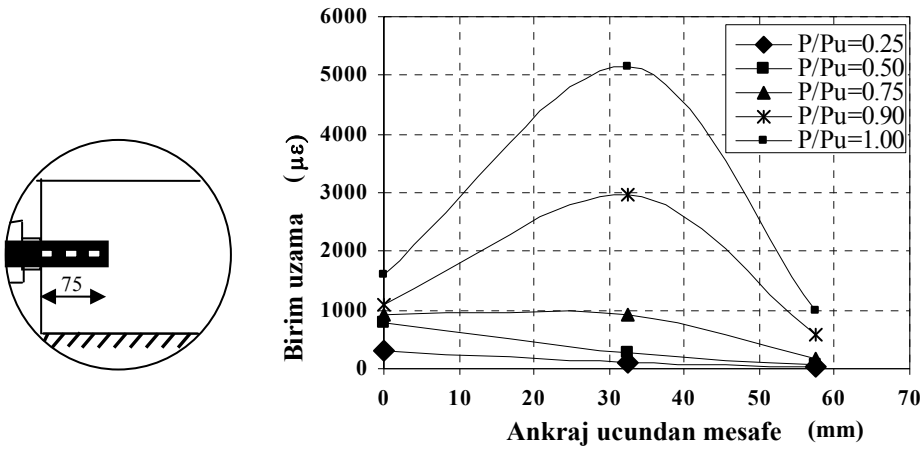


(b) Birim uzama ölçerlerin fotoğrafları

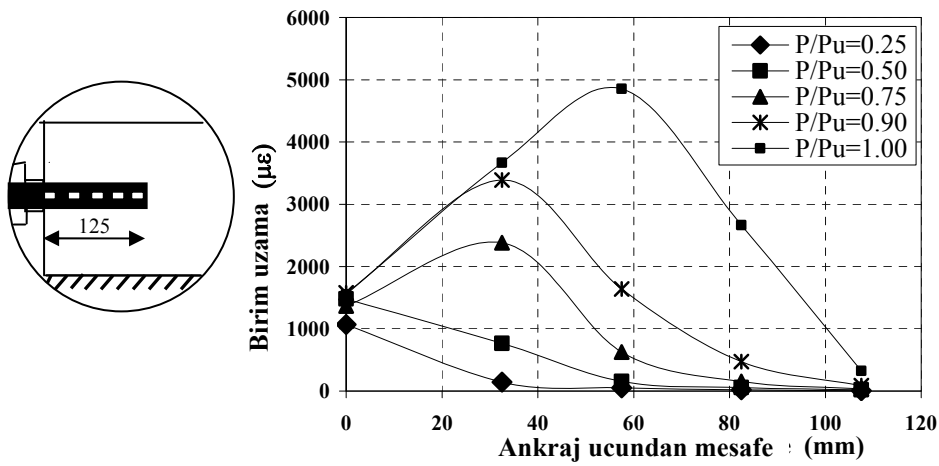
Şekil 2.8 Birim Uzama Ölçer Pozisyonları

75 mm genişliğindeki LP ankrajlar için, ki bu ankraj boyu etkin ankraj boyundan küçüktür, azami birim uzamalar şerit başından yaklaşık 32.5mm mesafede ölçülmüştür. 125mm genişliğindeki LPlar için (etkin boydan uzun) azami yükte en yüksek gerilme 57.5mm uzakta ölçülmüştür. Bunun sebebi ayrışmanın şerit başından bu mesafeye kadar gerçekleşmiş olması ve ilk 57mm'nin yük boşaltmasıdır. Azami yükte yaklaşık 107mm'de ölçülen birim uzamalar ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu da etkin ankraj uzunluğunun 100 ila 110mm civarında olduğunun kanıtıdır.

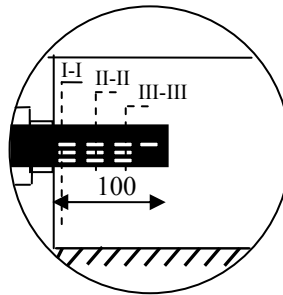
100mm ankraj boyuna sahip numune üzerine yapıştırılan birim uzama ölçerlerin yerleri Şekil 2.11'de verilmektedir. Görüldüğü üzere bu ölçümlerdeki amaç hem lif doğrultusunda hem de lif yönüne dik doğrultuda birim uzama profilleri elde etmektir. Deney esnasında bazı birim uzama ölçerlerin doğru olarak fonksiyonlarına getirememeri nedeniyle kısıtlı bir bilgi elde edilmiş olmasına rağmen, çalışan birim uzama ölçerlerden elde edilen sonuçlar profiller hakkında bir fikir vermiştir.



Şekil 2.9 $L_{frp}=75$ mm için LP birim uzama profilleri



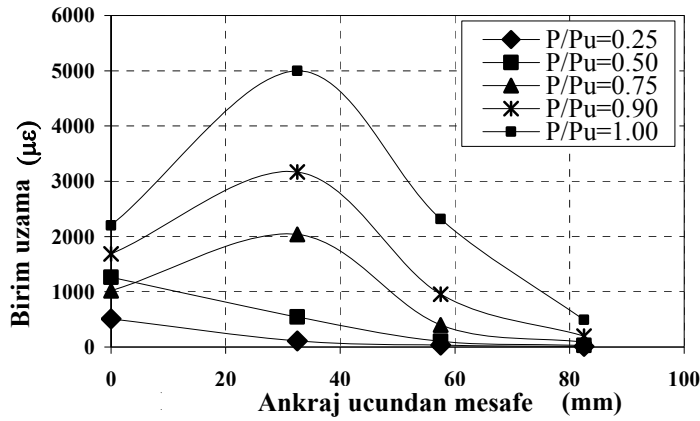
Şekil 2.10 $L_{frp}=125$ mm için LP birim uzama profilleri



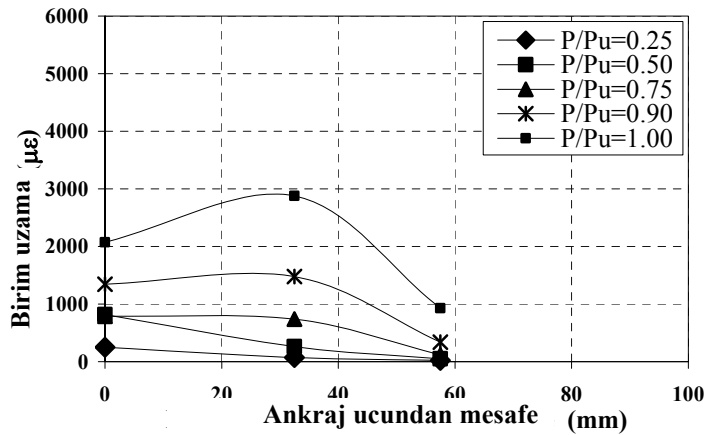
Şekil 2.11 $L_{frp}=100$ mm için LP üzerine yapıştırılan birim uzama ölçerlerinin konumları

Lif doğrultusunda elde edilen birim uzama profilleri Şekil 2.12 ve 2.13'te verilmektedir. Daha önceki sonuçlara (Şekil 2.9 ve 2.10) benzer olarak en yüksek yükün yarısını aşan durumlarda azami birim uzamalar ikinci birim uzama ölçerde gözlemlenmiştir. Görüldüğü üzere ankraj ucundan uzaklaştıkça birim uzamalar hızla azalmakta ve etkin birim uzama boyunun 100 mm civarında olduğuna kanaat getirmeye yardımcı olmaktadır.

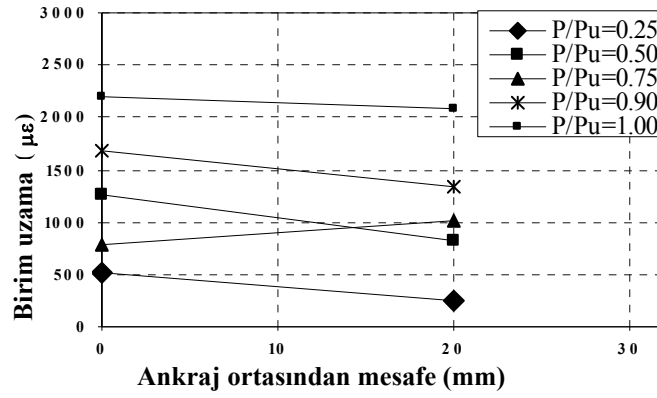
Şekil 2.11'de gösterilen I-I, II-II, and III-III kesitlerine ait birim uzama sonuçları Şekil 2.14, 2.15 ve 2.16'da sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre şerit boyunca dahi birim uzamalar düzgün olmaktan uzaktır. Gerçek birim uzama aslında üç boyutlu bir yüzeyle temsil edilebilir. Buna göre azami uzama şerit ortasında oluşmakta ve şerit kenarlarına doğru azalım göstermektedir. LP ayrışmasına denk gelecek kritik birim uzamayı tespit etmek için gerçekleştirilecek ileriki deneysel programlarda şerit ortasında alınacak ölçümlerin daha gerçekçi ve kritik olacağını belirtmekte fayda vardır.



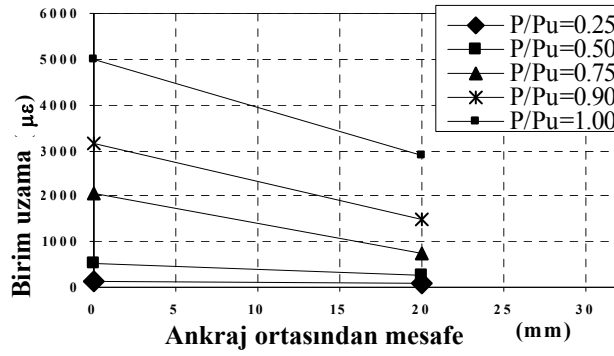
Şekil 2.12 $L_{frp}=100$ mm için ortada boyuna yönde birim uzama profilleri



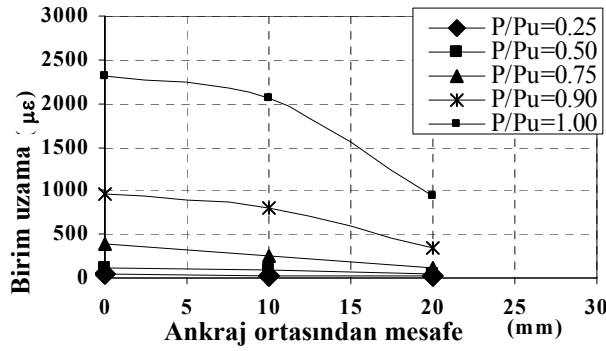
Şekil 2.13 $L_{frp}=100$ mm için dışta boyuna yönde birim uzama profilleri



Şekil 2.14 $L_{frp}=100$ mm için I-I kesitinde birim uzamalar



Şekil 2.15 $L_{frp}=100$ mm için II-II kesitinde birim uzamalar



Şekil 2.16 $L_{frp}=100$ mm için III-III kesitinde birim uzamalar

3. LP-BETON KENETLENME DAYANIMI: ANALİTİK MODEL

3.1 Şerit Tipi Ankrajlar

Birim uzama ölçümlerinde de gözlemlendiği üzere ankraj üzerinde bir noktada gerilme en üst düzeyine çıkar ve ayrışmanın başlaması ile bu noktadan sonra düşmeye başlar (Yuan 2004). Sistem en yüksek kapasitesine (lineer olmayan artan bölge sonundaki yük değeri) kesme gerilmesinin bu düşme trendi sonunda sıfıra ulaştığı anda (dayanımın bittiği anda) ulaşır. İlginçtir ki kesme gerilmesinin boşalma ile serbest uçta sıfır olduğu anda sistemin deplasmanı serbest ucun deplasmanına eşit olur. Eğer ara yüzdeki kayma ve kesme dayanımları tam olarak bilinirse, şerit tipi ankrajın azami taşıma kapasitesi hesaplanabilir. Bu bölümde deneysel program dahilinde ölçülen ve en yüksek dayanım anında elde edilen deplasman değerleri, tasarıma yönelik bir model oluşturulması amacı ile kullanılmıştır. Analitik model için şu kabuller yapılmıştır: 1) Tüm malzemeler homojen ve lineer elastiktir, 2) Dönme etkileri ihmal edilmiştir, 3) Gerilmeler en kesitte yüzey üzerine düzgün yayılmıştır, 4) Malzeme genişlik ve kalınlıkları tüm kesitte sabittir, 5) KLP ve sıva sadece kesme alacak kadar incedir. Bu elastik problemin ana denkleminin (Denklem 3.1) Şekil 3.1’de verilen sebest cisim diyagramları yardımı ile elde edilişi Ek-1’de verilmiştir.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \tau \left(\frac{1}{E_{frp} t_{frp}} \right) \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de verilen E_{frp} , t_{frp} , δ ve τ sırasıyla LP elastise modülü, LP kalınlığı, kayma deformasyonu ve ara yüzey kayma gerilmesidir. Literatürde birçok lineer olmayan KLP-ara yüzey modeli geliştirilmiştir (Dai , 2005; Nabaka , 2001; Lu , 2005). Beton yüzeylere yapıştırılmış KLP’lerin tüm davranışını ve özellikleri lineer yumuşama modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Ancak bu modellerin kullanılabilmesi için lineer olmayan denklem kümelerinin iterativ yöntemler ile çözülmesi gereklidir ki bu da tasarımda kullanabilmek için pratik değildir. Bu çalışmada sistemin dayanım kapasitesini daha pratik hesaplayabilmek için lineer olmayan davranışa sahip yapıştırıcı ve sıva tabakalarını, zayıf malzemenin kesme dayanımına ulaşana kadarki kısımları, elastik davranışa sahip olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.2). Burada tanımlanan zayıf katmanın kesme dayanımı KLP’in dayanımına, τ_f , eşittir. Bu sayede karışık iterativ hesaplamalara neden olan lineer olmayan düşüş davranışı doğruluktan ödün vermeyen bir kabullenme ile engellenir. Denklem 3.1 sıfıra eşitlenecek şekilde yazılarak Denklem 3.2 elde edilir.

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \tau \lambda = 0 \quad (3.2)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f}{\delta_u t_{frp} E_{frp}} \quad (3.3)$$

τ_f ve δ_u sırasıyla ara yüzey kayma dayanımı ve en büyük kayma deplasmanıdır. Denklem 3.2'nin genel

çözümü $\tau = C_1 \sinh(\lambda x) + C_2 \cosh(\lambda x)$ şeklindedir. Sınır koşullarını kullanarak ($\sigma = 0$ at $x = 0$ ve

$\sigma = P/(t_{frp} b_{frp})$ at $x = L_{frp}$), kayma gerilmesi bulunur:

$$\tau = \frac{P \lambda \cosh(\lambda x)}{b_{frp} \sinh(\lambda L)} \quad (3.4)$$

Ankrajın azami kapasitesi, P_u , $x=L_{frp}$ noktasında τ gerilmesi τ_f limit değerine ulaşınca gerçekleşir. Bu

koşulları birleştirmek sureti ile P_u şu şekilde ifade edilir:

$$P_u = \sqrt{\tau_f \delta_u} \sqrt{E_{frp} t_{frp} b_{frp}} \tanh\left(\frac{\theta L_{frp}}{L_e}\right) \quad (3.5)$$

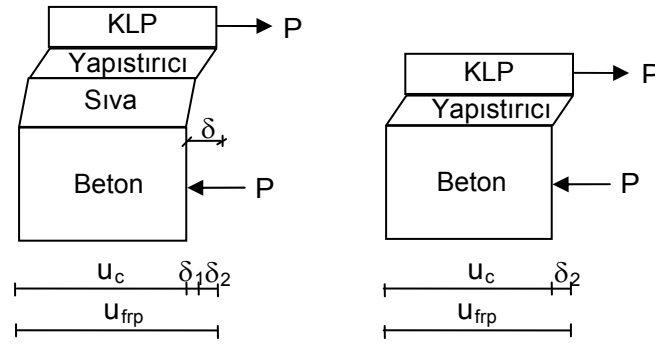
Denklem 3.5'te verilen b_{frp} KLP plakanın genişliği ve L_e ise önceden de tanımlanmış olan (Yao, 2005) ve daha uzun boylar kullanılsa dahi dayanımda önemli bir artışa sebep olmayacak etkin boydur. Etkatif boy ifadesi Denklem 3.7' de verilmiştir.

$$\theta = \sqrt{\frac{\tau_f}{\delta_u \sqrt{f_c}}} \quad (3.6)$$

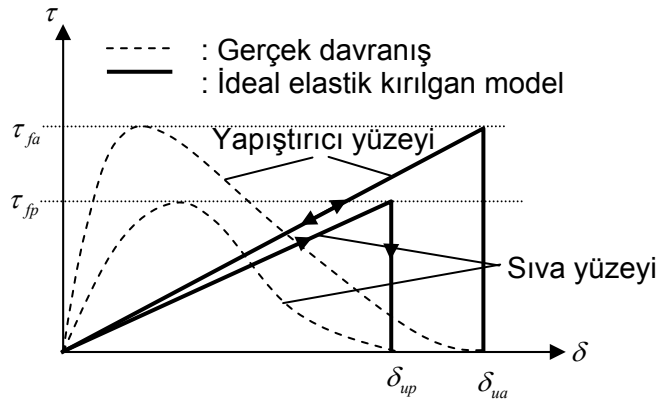
$$L_e = \sqrt{\frac{E_{frp} t_{frp}}{\sqrt{f_c}}} \quad (3.7)$$

Denklem 3.5'te bulunan "tanh" teriminin etkin boy parametresini denkleme dahil ettiğini gözlemlemek ilginçtir, çünkü yapıştırılan ankaraj boyu etkin yapıştırma boyunun yaklaşık 1.5 katına ulaştığında, "tanh" terimi hızlı bir şekilde bire yakınsar ve Denklem 3.5'te verilen ilk iki terimin çarpımı ankarajın en büyük taşıma kapasitesine eşit olur.

Denklem 3.5'te verilen ankaraj dayanım kapasitesi ifadesi KLP yapıştırılmış sıvalı veya sıvasız beton ve tuğla yüzeyler için kullanılabilir. Sıvalı yüzeylerin dayanım hesabında sıvanın kesme dayanımı ve maksimum kayma deplasmanı (τ_{fp} , δ_{up}) sırasıyla τ_f ve δ_u ifadelerinin yerine yazılmalıdır (Şekil 3.2). Sıvasız yüzeylerin dayanım hesabında ise τ_{fa} ve δ_{ua} ifadelerinin sırasıyla τ_f ve δ_u ifadeleri yerine yazılması yeterlidir (Denklem 3.5). Modelde bu parametreler test sonuçlarına dayanılarak elde edilmiştir ve aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.1 Sıvalı ve sıvasız numunelerin deplasmanları



Şekil 3.2 Modellerin gerilim-birim uzama ilişkileri

3.1.1 Model Parametrelerinin Kalibre Edilmesi

Bu çalışmada betona yapıştırılmış plakaların yüzeysel kesme dayanımları için Savioa (2003) tarafından verilen, doğruluğu ve basitliğine istinaden tercih edilen ve Denklem 3.8 ile verilen ifade kullanılmıştır.

$$\tau = \omega f_c^{0.19} \quad (3.8)$$

Orijinal modelde, Savioa (2003) beton yüzeylere yapıştırılmış KLP plakalar için ω değerini 3.5 olarak vermiştir. Bu çalışmada tuğla ve sıvalı numuneler için düşük dayanımlarına ve boşluklu yapılarına istinaden ω değeri 2 olarak alınmıştır. Diğer bir parametre olan en büyük yük kapasitesindeki kayma deplasmanı, δ_u , ise deneyler sonucu elde edilen verilere göre ayarlanmıştır. Bu değer aslında KLP yapıştırılmış iki bloğun arasında ölçülen deplasmanın KLP plakanın uzamasından çıkarılması ile elde edilmiştir. Bu maksimum kayma deney verilerinden elde edilirken, bloklar arasında kalan yapıştırılmamış KLP bölgesinin elastik uzaması ölçüm araçlarından elde edilen bloklar arası bağıl mesafeden çıkarılması ile sağlanmıştır. Bu hesaplamalar sırasında blokların deformasyonları KLP plakaların uzamalarına oranla çok küçük olduğundan dolayı ihmal edilmiştir.

Ankaraja ait kayma deplasmanının blok basınç dayanımı, yapıştırma boyunun etkin boya oranı ve genişlik oranı parametrelerinin bir fonksiyonu olduğu kabul edilmiş ve bu deplasman 103 adet deney sonucu (bu çalışma, Binici ve Bayrak, 2004; Nabaka 2001) kullanılarak (Denklem 3.8'de verilen ifade yardımıyla) yapılan nonlinear regresyon analizi elde edilmiştir.

$$\delta_u = f_c^\alpha \left(\frac{L_{frp}}{L_e} \right)^\beta \left(\frac{b_{frp}}{b_c} \right)^\gamma \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'de verilen b_c değeri blok genişliğidir. Lineer olmayan regresyon analizi ile elde edilen α , β ve γ katsayıları ise Tablo 3.1'de verilmiştir. Denklem 8 kullanılarak elde edilen deplasman değerleri ile deneyler sonucunda elde edilen deplasman değerleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi Denklem 3.9'da verilen ifade kullanılarak, elde edilen deney sonuçlarının %90'ı en fazla %25'lik bir hata payı içermektedir. Bu kesinlik böylesi malzeme ve işçiliğe bağlı olan bir problem için yeterli kabul edilebilir.

Tablo 3.1 Deplasman denklemi katsayıları

Parametreler r	Beton	Tuğla	Sıvalı Numuneler
α	-0.4	-0.4	-0.4
β	0.80	0.80	0.80
γ	0.40	0.50	0.90

3.1.2 Modellen Deney Sonuçları ile Kıyaslanması

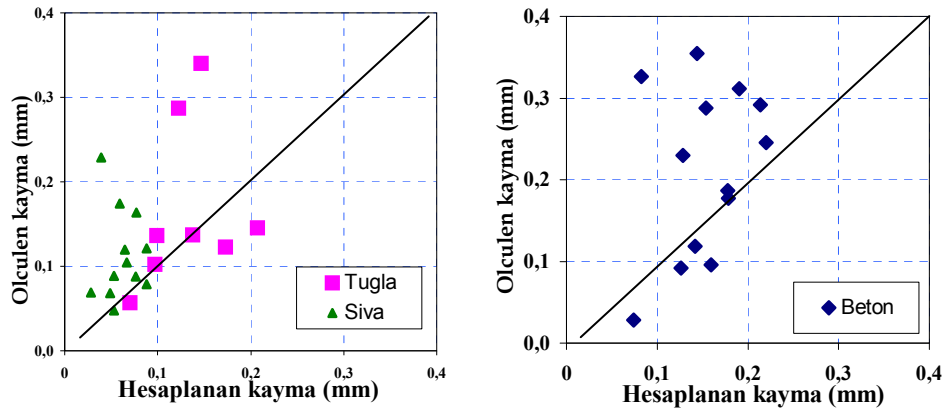
Modelden elde edilen sonuçlar (ankraj kapasitesi) ile deney sonuçlarının sıvalı ve sıvasız numuneler için kıyaslanması Şekil 3.4'te verilmiştir. Hesaplanan kenetlenme dayanımının deneysel dayanıma oranı ortalama 0.99 olurken, standart sapma ise 0.2 civarında olmuştur (Tablo 3.2). Bu çalışmada sunulan deney sonuçları, yine bu çalışma kapsamında sunulan ve sıvalı veya sıvasız tuğla ve beton bloklara yapıştırılmış KLP plakların dayanımlarını veren model ile iyi bir uyum göstermektedir. Bu çalışmada sunulan ankraj dayanım modeli diğer araştırmacıların deney verileriyle de sınılanmış ve sonuçlar Tablo 3.2 ve Şekil 3.5'te sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde model genel olarak ölçülmüş dayanım verileri ile örtüşürken, b_{frp}/b_c oranı 1'e yakın olan numunelerde bir sapma gözlenmiştir. Bu sapmanın ana nedeni regresyon analizinde kullanılabilecek yeterli sayıda yüksek genişlik oranlı ($b_{frp}/b_c=1$) veri bulunamamış olmasıdır. Buna karşın bu aralıkta yapılacak ek deneyler yardımı ile modeldeki bu boşluğun başarılı bir şekilde doldurulabileceği düşünülmektedir. Bu deneysel programda elde edilen deneysel ankraj dayanımları diğer araştırmacılar (Chen, 2001; Malek, 1998; Neubauer 1999) tarafından geliştirilen modellerin tahminleri ile sınılanmış sonuçlar Tablo 3.3'te verilmiştir. Bu tabloda da görüldüğü üzere bu çalışma kapsamında geliştirilen model diğer modellere göre düşük standart sapmalı daha iyi sonuçlar vermiştir.

3.2 Gömme Tipi Ankrajlar

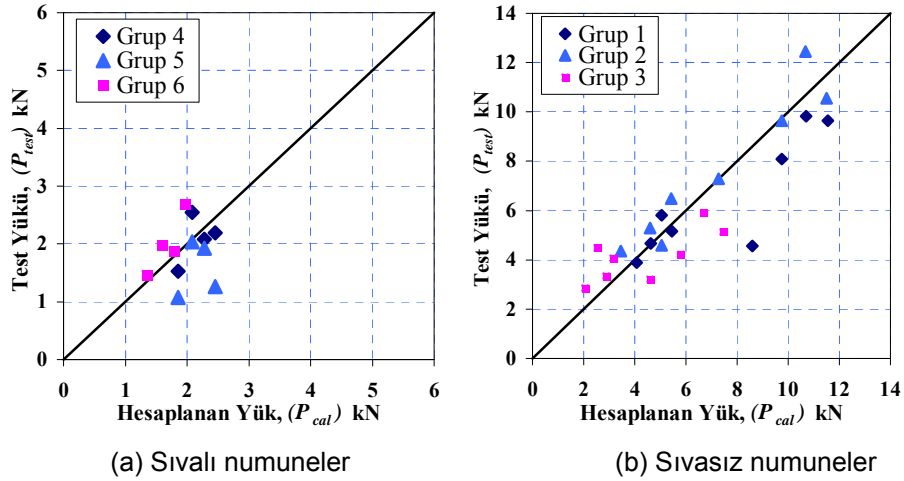
Bu çalışmada sunulan deneylerin sonuçları ve yapılan gözlemlerin yardımı ile gömme tipi ankarajların kesme dayanımının hesaplanmasında kullanılan ve tasarım aşaması için çok önemli olan basitlik ilkesinden ödün vermeyen bir model oluşturulmuştur. Sıvalı veya sıvasız tuğla ve beton numunelerin deney sonuçlarını sağlayan bu basit ve güvenli model Denklem 3.10`da verilmiştir.

$$P_u = \alpha t_{frp} b_{frp} f_{frp} \quad (3.10)$$

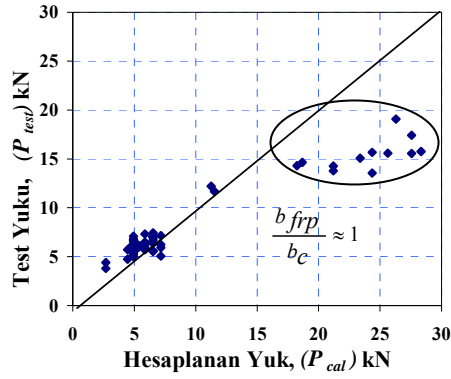
α sıvalı ve sıvasız numuneler için sırası ile 0.35 ve 0.5 olarak verilmiştir. Şekil 2.4`te de görüleceği gibi gömme tipi ankarajlar kullanılarak KLP kapasitesinin %50`sine varan oranlarda ankaraj dayanımı elde edilmiştir.



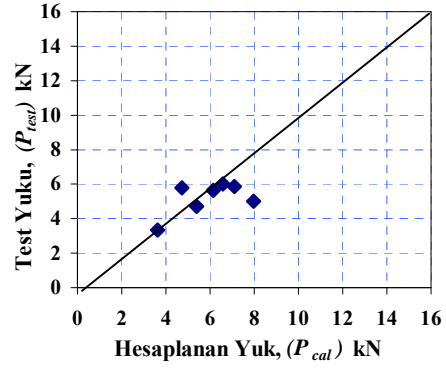
Şekil 3.3 Deneyel-hesaplanan kayma deformasyonları



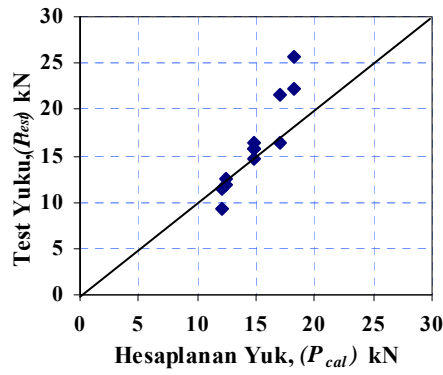
Şekil 3.4 Şerit tipi ankarajların hesaplanan yük-test yükü ilişkileri



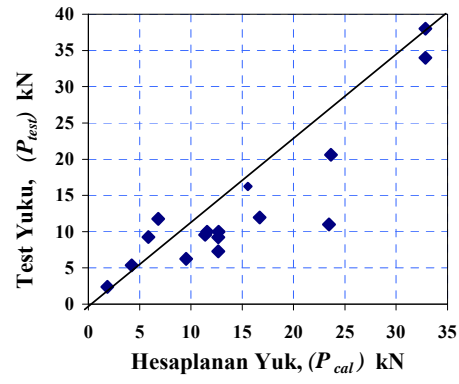
(a) Yao (2005)



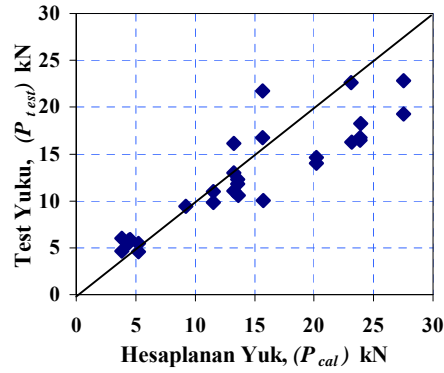
(b) Binici ve Bayrak (2004)



(c) Nabaka (2001)



(d) Ueda (1999)



(e) Ren (2003)

Şekil 3.5 Modelin literatürdeki veriler ile kıyaslanması

Tablo 3.2 Modelin diğer deneyler ile karşılaştırılması

Araştırmacılar	Deney Sayısı	Hesaplanan dayanımın deney dayanımına oranı	COV	Standart Sapma
Bu çalışma	57	0.99	0.26	0.26
Binici ve Bayrak (2004)	7	0.90	0.20	0.18
Nabaka (2001)	36	1.06	0.16	0.17
Chen ve Teng (2001)	70	1.06	0.23	0.24
Ueda (1999)	16	0.98	0.36	0.35
Ren (2003)	36	0.98	0.26	0.25

Tablo 3.3 Bu çalışmaya ait verilerin diğer modellerin kapasite tahminleri ile kıyaslanması

	Hesaplanan dayanımın deney dayanımına oran	COV	Standart Sapma
Bu Çalışma	0.99	0.26	0.26
Neubauer ve Rostásy (1999)	0.85	0.30	0.26
Chen ve Teng (2001)	0.75	0.31	0.23
Maeda (1997)	0.57	0.45	0.26

3.3 Fan Tipi Ankarajlar

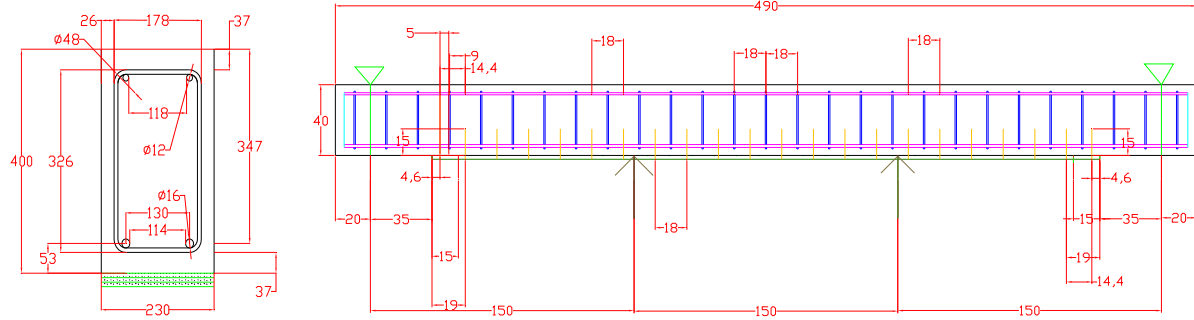
Deneyleri sonucunda, yanal bağlantı şeritlerine sahip olan KLP kullanılarak hazırlanan fan tipi ankarajların dayanım üzerindeki etkilerinin kısıtlı olduğu gözlenmiştir. Dahası, bu tip ankarajlar fan açısının 30°'yi geçmesi durumunda dayanımı düşürmektedirler. Bu nedenle KLP demetleri şeklinde hazırlanan fan ankarajların kullanımı engellenmelidir.

4. LP İLE KİRİŞ GÜÇLENDİRMESİ: DENEYSEL PROGRAM

Bu kısımda yukarıda anlatılan ve faydalı olduğu görülen ankrajların kiriş güçlendirmelerinde kullanılması durumunda ne gibi faydalar elde edilebileceğini görmek için dört adet kiriş dört nokta deney sonuçları verilmektedir. Deney sonuçları literatürde kiriş kapasitesini tahmin etmek için kullanılan metotlardan elde edilen kapasite sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.1 Deney Elemanları

İkinci faz bu deneyler için toplam dört adet kiriş hazırlanmıştır. Deney elemanları ülkemizde görülen tipik boyutlara, detaylara ve düşük beton dayanımına sahiptir. Kesit özellikleri ve detayları Şekil 4.1'de verilmiştir. Deney elemanları ve LP ile güçlendirme ve ankraj durumları Tablo 4.1'de sunulmaktadır. Görüldüğü üzere R1 deney elemanı referans numunesi olarak hazırlanmış ve LP ile güçlendirilmemiştir. G1 elemanı tek kat LP'nin çekme bölgesine yapıştırılması ile güçlendirilmiş, ancak herhangi bir ankraj kullanılmamıştır. G2 ve G3 elemanlarında tek kat LP uygulamasından sonra sırası ile bulon ve gömme tip ankrajlar kullanılmıştır. LP ile güçlendirilmiş elemanların detayları Şekil 4.2'de verilmektedir. Görüldüğü üzere LP bulonlar ve gömme uçlu bantlar yaklaşık etriye aralığı kadar (180mm) aralıklarla yerleştirilmiştir. Bulon ve ucu gömme şerit bantlarıyerleri uygulaması Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



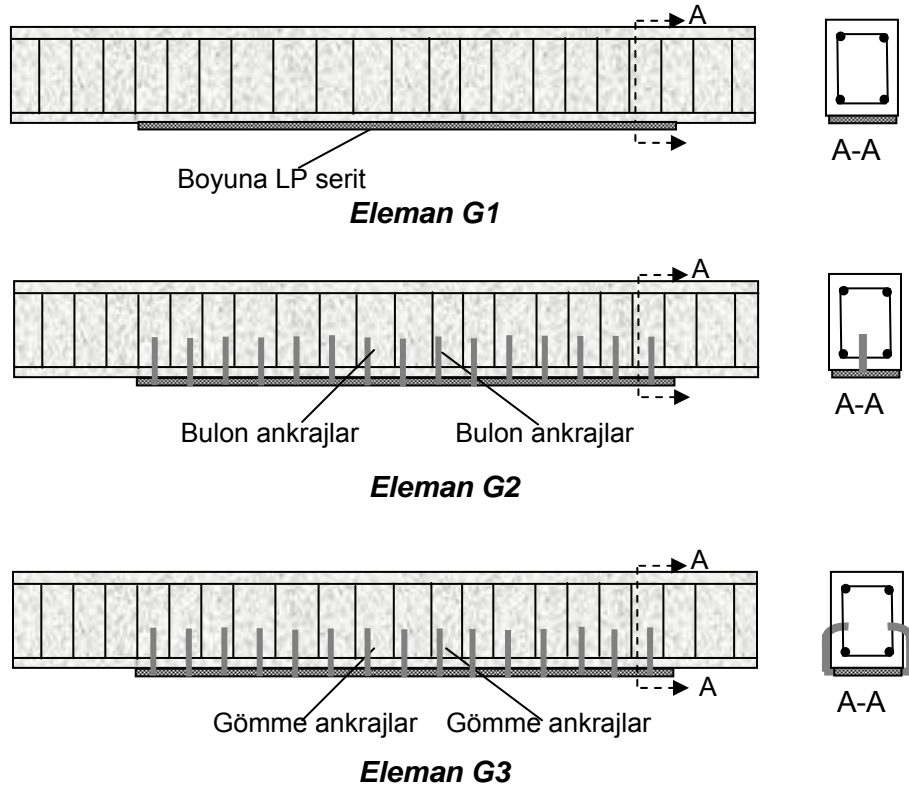
a) Deney Kiriş Kesiti

b) Deney kiriş boyuna donatı ve etriye detayları

Şekil 4.1 Deney Kiriş Detayları

Tablo 4.1 Deney Eleman Detayları

Deney Elemanları	LP Detayları	28 günlük beton basınç dayanımı (MPa)	Boyuna donatı akma dayanımı (12mm ve 16 mm için) (MPa)	Etriye akma dayanımı (MPa)
R1	Yok	13.6	331, 460	485
G1	Tek kat LP şerit	13.6	331, 460	485
G2	Tek kat LP + Bulon Ankraj	13.6	331, 460	485
G3	Tek kat LP + Gömme uçlu şerit bant	13.6	331, 460	485



Şekil 4.2 Güçlendirilmiş Deney Elemanlarında LP Uygulama Esasları

Deney elemanları tasarımı tamamlandıktan sonra laboratuvarı imalata geçilmiştir. Öncelikle yaklaşık 100 etriye laboratuvarı bükülmüş ve kiriş kafesleri hazırlanmıştır (Şekil 4.3). Daha sonra laboratuvarı çelik levhalardan kalıp imal edilmiş ve kafesler kalıp içine yerleştirilmiştir. Dökümlerde BS20 betonunun teslimatta sulandırılması ile elde edilen düşük dayanımlı (~10MPa) beton kullanılmıştır. 28 günlük kür süresinden sonra numunelerin LP yapıştırılacak yüzeyleri tozdan arındırılmış ve LP yapıştırılmasına uygun hale getirilmiştir. Bu esnada bulon ankrajlı numune için bulon delikleri hazırlanmış (150 mm derinliğinde 20mm çapında) ve deliklerin köşeleri gerilme yığılmalarını engellemek için yuvarlanmıştır. LP yapıştırılmasından evvel birer kat astar ve epoksi yüzeye düzgün bir şekilde yayılmıştır. Bulonlu numune için bu esnada bulonlar hazırlanmış ve deliklerin içine yerleştirilmiştir (Şekil 4.4). Daha sonra istenilen boyda kesilen tek kat LP şerit yüzeye yerleştirilip üst yüzey epoksi ile doyurularak güçlendirme tamamlanmıştır. Bulonlar (eğer var ise) dikkatli bir şekilde LP şerit içinden geçirilmiş ve fan şekline açılarak boyuna LP plaka üzerine ankrajlanmıştır. Şerit LP bantları (G3 numunesi için) boyuna LP yapıştırma işlemi yapıldıktan sonra yapıştırılmış ve kiriş yanlarında açılan 50 mm derinliğindeki deliklere ankre edilmiştir. Güçlendirme detaylarına ilişkin fotoğraflar Şekil 4.4'te verilmektedir.

4.2 Deney Düzeneği ve Ölçümler

Deney elemanlarının test edilmesi standart dört nokta yüklemeli kiriş düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için laboratuvarı yürütülen başka bir proje ile ortak olarak düzenek hazırlanmıştır. Düzenek detayları Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Buna göre kirişler çekme bölgesi üste gelecek şekilde ters olarak test edilmiştir. Bu şekilde çatlama, ayrışma, LP kopma yeri gibi önemli olayların test esnasında belgelenmesi mümkün olmuştur. Yük tek bir vanadan kontrol edilen iki piston vasıtası ile numune uç bölgelerine dikey olarak etki ettirilmiştir. Yük altındaki ve açıklık ortasındaki deplasmanlar deplasman-ölçerler vasıtasıyla ölçülmüş ve proje kapsamında alınan veri toplama sistemi yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Ölçülen deplasman noktalarına iki adet LVDT yerleştirilerek deney esnasında meydana gelebilecek LVDT bozulmasına önlem alınmıştır. Yükleme akmaya kadar yük kontrolünde 5kN'luk artırımlarla sürdürülmüş daha sonra deplasman kontrolüne geçilerek 5mm'lik yük altı deplasman atımları ile deneye devam edilmiştir.

4.3 Deney Sonuçları ve Gözlemler

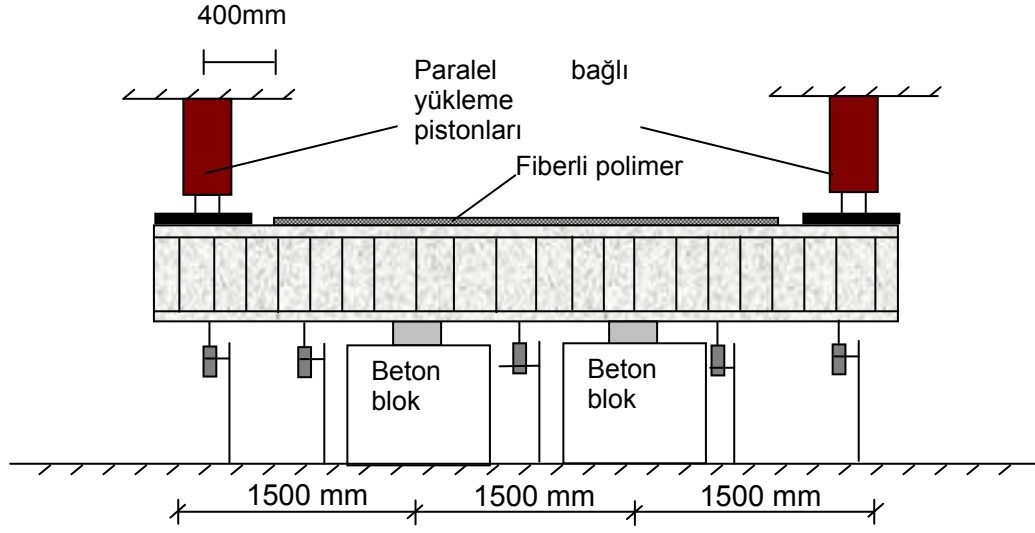
Deneylerden elde edilen yük-orta deplasman ve yük-yük altı deplasmanların grafikleri Şekil 5.6 ve 5.7 verilmektedir. Numunelerin deney sırasında çekilmiş hasarlı fotoğrafları Şekil 5.8'de verilmektedir.



Şekil 4.3 Deney elemanlarının hazırlanması



Şekil 4.4 LP ile güçlendirme ve ankrajların yerleştirilmesi



Şekil 4.5 Deney düzeneği

4.3.1 Eleman R1

Bu numunede standart eğilme davranışı gözlemlenmiştir. İlk çatlaklar yaklaşık 18kN'luk bir yükte gözlemlenmiş ve çatlama yük-deplasman eğrilerinden gözlemlendiği üzere rijitlik kaybına neden olmuştur. dolay yük deformasyon eğrisi rijitlik kaybından eğilmiştir. Yaklaşık 63 kN'a kadar yeni çatlakların sabit moment bölgesinde yaklaşık 30cm aralıklarla olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.8a). Bu yük seviyesinden

sonra elik donatıdaki akmadan ötürü yük deformasyon eğrisi plato bölgesine ulaşmıştır. Donatı akmasının ardından numunenin taşıdığı yükte fazla bir artış gözlemlenmeden deplasmanların arttığı farkedilmiş ve oldukça sünek bir davranış ortaya çıkmıştır. Orta nokta deplasmanı yaklaşık 35 mm'ye ve yk altı deplasmanı yaklaşık 65 mm'ye geldiğinde numunenin yükü (azami yük 70kN) boşaltılmıştır. Bu deneyin amacı numunenin LP ile güçlendirmeden önce taşıma kapasitesini tahmin etmek olduğundan daha ileri deplasmanlara gidilerek beton ezilmesi donatı burkulması gibi olayların gözlemlenmesi hedeflenmemiştir.

4.3.2 Eleman G1

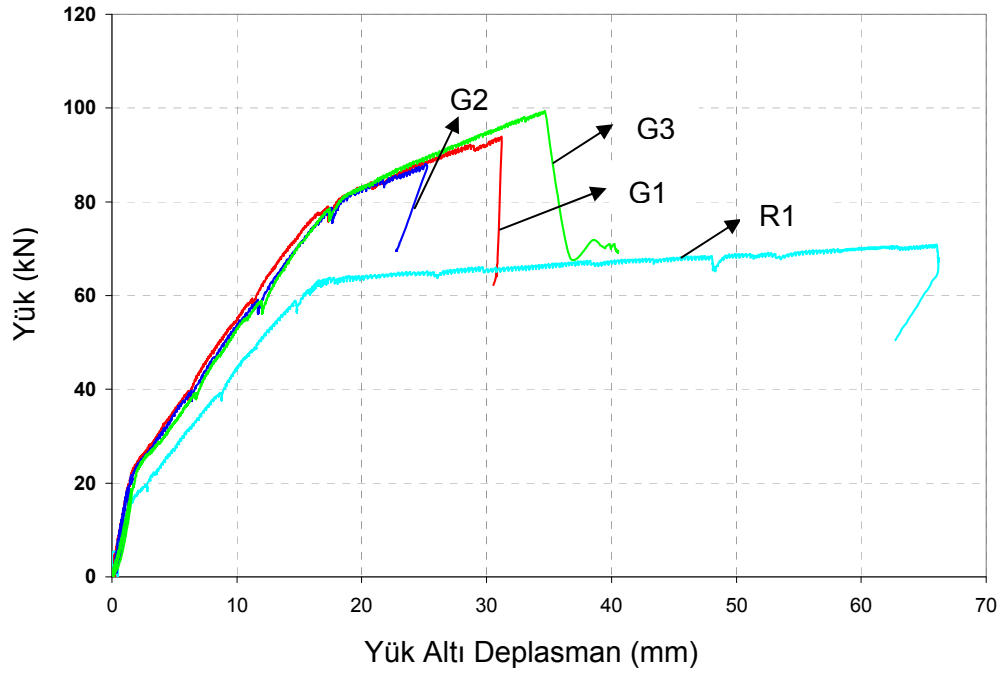
Bu elemanda LP ile güçlendirilmiş kirişin davranışı gözlemlenmiştir. Numunede atlama yaklaşık olarak 23kN'luk bir yükte gözlemlenmiş ve bu yük R1 deney elemanında gözlemlenen çatlama yüküne göre yaklaşık %20 daha fazladır. Çatlama yükünde görülen bu artış LP'nin çatlamayı geciktirme etkisine atfedilebilir. Yük-deformasyon eğrisinden görüldüğü üzere çatlamadan sonra elde edilen çatlamış kiriş rijitliği de R1 elemanına göre daha yüksektir. Çatlama yk seviyesinden itibaren eğilme çatlaklarının boyları uzamış ve R1 elemanındaki çatlak aralığı le benzer aralıklarla sabit moment bölgesini kuşatmıştır. Daha ileriki yk aşamalarında (yaklaşık 80kN) epoksiden gelen çatlama sesleri işitilmiştir. Yaklaşık 93kN'luk bir yükte aniden LPnin kiriş ortasında koptuğu ve beton paspayını da kaldırarak betondan ayrıştığı gözlemlenmiştir. Bu göçme konumunda kiriş ortasının yaklaşık 12 mm ve yk altı noktası ise 32 mm dikey deplasmanda olduğu gözlemlenmiştir. Bu aşamada deney elemanındaki azami yk kirişte LP etkisi ile yaklaşık %33'lk bir yük taşıma kapasitesi artisina işaret etmektedir.

4.3.3 Eleman G2

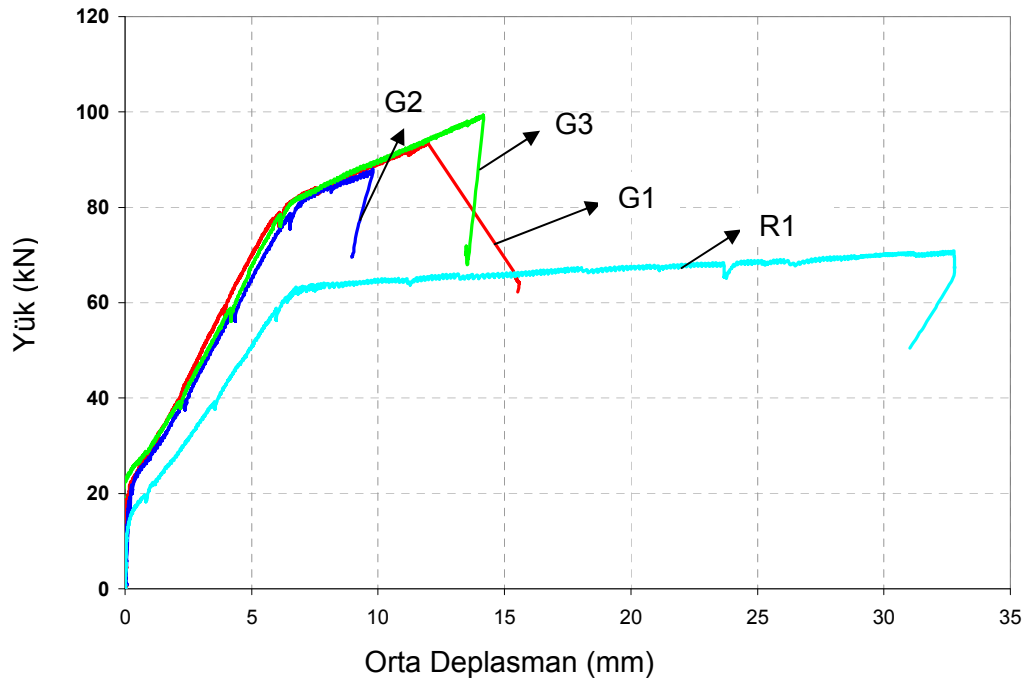
G2 deney numunesinde eğilme güçlendirmesi için kullanılan LP şeritlere ek olarak gömme bulon ankrajlar kullanılmıştır. şekil 4.6 ve 4.7'de görüldüğü üzere bu deney elemanının davranışı G1 elemanı ile benzelik göstermektedir. Çatlama hemen hemen aynı yüklerde görülmüş ve G1 elemanına benzer bir rijitlik kaybına yol açmıştır. LP kopması gelen yüksek sesli bir çatlama sesi ile mesnet üzerinde (sabit moment bölgesinin u kısmında) meydana gelmiştir. Bu numunede gözlemlenen en büyük fark akrajın ayrışmayı engellemesi beklenirken kirişin daha erken bir yükte göçmesine neden olmuş olmasıdır. Bunu sebebi ise LP şeritler içinden geçirilen bulonların fan şeklinde açıldığı mesnet üzeri bölgede gerilme yığılması yaratarak prematür kopmaya sebep olmasıdır. G2 deney elemanında gözlemlenen kapasite 87 kN olup G1 elemanının kapasitesinden yaklaşık %8 daha azdır.

4.3.4 Eleman G3

Bu deney elemanında LP şeritin yanı sıra LP şerit bantlar kullanılmış ve bu şerit bantların uçları kiriş yanaklarına gömülerek ankre edilmiştir. şekil 4.6 ve 4.7'de görüldüğü üzere G1 ve G2 deney elemanları ile başlangıç rijitliği çatlama ve çatlamadan sonra rijitlik kaybı açısından benzer davranış göstermiştir. Yanal



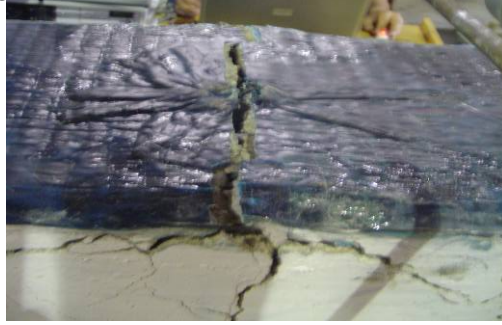
Şekil 4.6 Yük-yük altı deplasman grafikleri



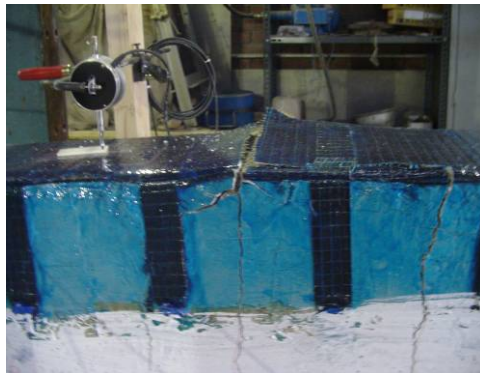
Şekil 4.7 Yük-orta deplasman grafikleri



a) G1 deney elemanı



b) G2 deney elemanı



b) G3 deney elemanı

Şekil 4.8 Deney Esnasında Çekilen Numune Fotoğrafları

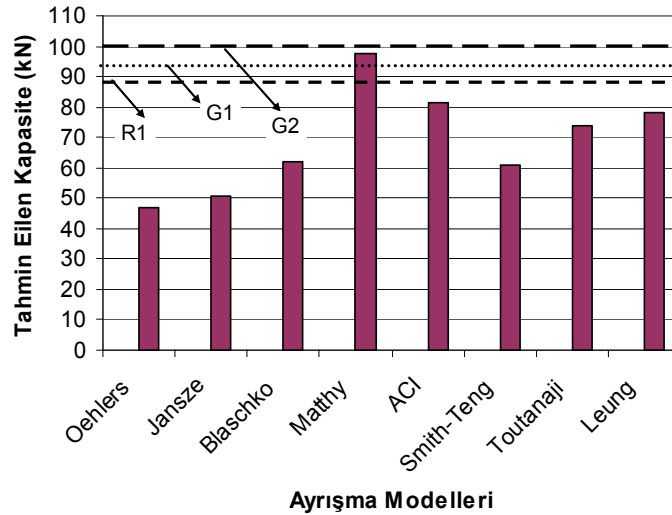
şeritlerin etkisi ile beton-LP arasındaki ayrışma engelleneceği düşünüldüğü halde göçme LP kopması sonucu yaklaşık 99kN'da meydana gelmiştir. Görüldüğü üzere bu elemanda gözlemlenen kapasite her iki güçlendirilmiş elemanın kapasitesinden de sırasıyla %7 (G1'den) ve %14 (G2'den) daha yüksektir. Deney esnasında şerit bantlı ankrajların kullanılması durumunda diğer iki duruma nazaran daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Bu sonuçla bu ankraj tekniğinin bulona göre daha ümit aat ediciği olduğu söylenebilir.

4.4 Sonuçların İrdelenmesi

Yukarıda belirtilen gözlemlerden en çarpıcı olanı beklenenin aksine LP ile güçlendirilen G1, G2 ve G3 elemanlarda LP kopması göçme şeklinin gözlemlenmiş olmasıdır. Bu beklenmedik göçme şekli sebebi ile

kullanılan ankrajların etkinliği tam oralarak açığa çıkmamıştır. Buna karşın tasarıma yönelik birtakım ilginç bulgular ortaya konmuştur. Bunlardan en önemlisi bulon ankrajların fan bölgelerinde gerilme yığılmasına sebep olarak ankrajsız duruma nazaran daha düşük kapasitelerin ortaya çıkmasına sebep olduğudur. Buna sonuca göre bulon ankrajların kiriş güçlendirmelerinde kullanılması ankrajlama değil gerilme yığılmasına sebep olarak daha düşük kapasiteler ortaya çıkardığıdır. Buna karşın gömme uçlu şerit bantların daha etkin olacağı düşünülmektedir.

Bu seri deneylerden elde edilen sonuca göre vurgulanması gereken diğer bir nokta da göçme modu ve ulaşılan kapasitedir. Deneyler tasarlanırken literatürde mevcut olan pek çok ayrışmayı tahmin için kullanılan model kullanılarak deneyden evvel kapasite tahmini yapılmıştır. Bu modeller için kullanılan denklemlerin özeti Smith ve Teng'in (2002) makalesinde ayrıntılı olarak verilmektedir. Burada vurgulanması gereken nokta tüm modellerin deneyi yapılan LP ile güçlendirilmiş kirişler için ayrışma göçme modu tahmin etmesidir. Bu nedenle de oldukça geniş bir aralıkta (45 ile 97 kN) ve bazı modeller için fazlasıyla güvenilir yönde kalan sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 4.9'dan da görüleceği gibi çeşitli modeller kullanılarak yapılan kapasite tahminleri elde edilen deneysel kapasitelere göre oldukça düşük değerler vermektedir. Buna göre literatürde mevcut olan modellerin fazlasıyla güvenli tarafta kalarak ekonomik olmayan LP tasarımlarına yol açacaktır. Bu konuda literatürde pek çok çalışma bulunmasına rağmen düşük dayanımlı kirişler ile yapılan deneylerde ortaya çıkan nokta kapasite artımının mevcut modeller ile pek de iyi tahmin edilemeyeceğidir. Bu bağlamda, elde edilen dört kiriş deneyi ile genellemelere veya tasarım kuralları çıkarımına varmanın mümkün olmadığı belirtilmelidir. Yapılması gereken daha geniş bir butçe ile ve asgari bir senelik araştırma programının yürütülmesi gerekmektedir.



Şekil 4.9 Çeşitli Modellere Göre Kapasitenin Tahmini

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Çalışmadan Çıkan Sonuçlar

Bu çalışmada, beton ve tuğla numuneler üzerine yapıştırılmış KLP plakaların kenetlenme dayanımını tespit etmek için ve iki ankraj metounun kiriş güçlendirmelerinde kullanımını incelemek için yapılan deneyler sunulmuştur. Yüzeyde bulunan sıvanın ve ankaraj tiplerinin dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ankraj metotlarının etkinliği araştırılmıştır. Birinci kısım deneyler sonucunda ortaya çıkan veriler kullanılarak tasarıma yönelik bir model ortaya konmuş ve modelin gerçekliği bu çalışmada yürütülen ve literatürdeki diğer çalışmaların sonuçlarından elde edilen veriler ışığında gerçekleşmiştir.

Bu çalışmanın önemli sonuçları aşağıda listelenmiştir:

1. Kenetlenme dayanımı ankraj boyuna ve genişliğine bağlıdır. Bu etkenler beton ya da tuğla basınç dayanımına oranla kenetlenme kapasitesini daha fazla etkilemektedir. Ankraj boyu, etkin ankraj boyuna ulaşana kadar ankraj kapasitesi artar ve bu boydan sonra ise genellikle sabit kalır. Ankraj genişliğindeki artış dayanımın düşmesine neden olur. Bu kavramın düşük dayanımlı beton ve tuğla numuneler için de geçerli olduğu gözlemlenmiştir.
2. Zayıf tuğla kesiti ve yüzey süreksizlikleri nedeniyle tuğla numunelerde ankraj dayanımları daha düşük olmuştur. Mevcut, beton üzerine LP kapasitesini tahmin için kullanılan yöntemler, tuğla-LP ayrışmasını tahmin etmekte güvenli sonuçlar vermemektedir.
3. Yapıştırma yüzeyinde bulunan sıvanın KLP kapasitesinin etkilediği anlaşılmıştır. İnce bir sıva tabakasının mevcudiyeti dayanımda benzer özellikli ama sıvasız numunelere kıyasla üçte bir oranda düşüşe neden olmuştur. Bu sonuçlara dayanılarak sıvalı yüzeylere ankarajsız yapıştırılan KLP plakaların uygulamalarında dikkatli olunması ve KLP bulonlar kullanılması gereklidir. Henrhangi bir ankrajlama kullanmadan sıva üzerine yapıştırılan LP'ler etkin olarak çalışmaz ve beklenen çekme dayanımını sağlamaktan uzaktır.
4. Gömme tip ankrajlar kullanılarak KLP dayanımının şerit tip ankrajlara göre neredeyse iki kat arttığı gözlenmiştir. Beton blokların veya tuğlaların basınç dayanımları ankrajın taşıma kapasitesini etkilememiştir. Beton numunelerde farklı gömme derinlikleri için benzer dayanım kapasiteleri elde edilmiştir. Tuğla numunelerde kullanılan KLP bulonların yerleri ve sayıları ankrajların dayanım kapasitelerini etkilememiştir. Gömme tipi ankrajlar kesme bağlaçları gibi çalışarak ayrışmayı geciktirmişler ve dayanım kapasitesinin arttırmışlardır.
5. 30°'ye kadar artan fan açısının ankraj dayanımında sinirli bir artış sağladığı, 30°'den büyük açının ise fan ağız çevresinde prematüre göçmesi dolayısıyla dayanımda düşüşlere neden olduğu gözlenmiştir. Yatay bağlantı şeritlerine sahip KLP plakalarının fan tipi ankraj olarak kullanılması tavsiye edilmemektedir.
6. Parametreleri bu çalışma kapsamındaki ve literatürdeki deneylerin sonuçlarına göre ayarlanan diğer araştırmacıların deney sonuçlarından elde edilen kapasiteleri de tahmin edebilen basit bir model geliştirilmiştir. Bu model, LP tasarımı esnasında düşük dayanımlı beton ve tuğlaya sıvalı

7. Yapılan kiriş deneylerinde beklenmedik bir göçme modu olarak LP kopması gözlemlenmiştir. Literatürde mevcut olan modeller kullanılarak yapılan tüm tahminler LP-beton ayrışması göçme şekline işaret ederken tahmin edilenden yüksek bir kapasitede LP kopması gözlemlenmiştir. Bu sonuç var olan modellerin düşük dayanımlı kirişlerin LP ile güçlendirmelerinde fazlasıyla güvenli tarafta kalarak ekonomik olmayan güçlendirmelere yol açabileceğini göstermiştir.
8. Bulon ankrajlar eğilme güçlendirmesi için kiriş çekme bölgelerinde kullanıldığında gerilme yığılmalarına neden olduğundan ankrajsız duruma göre daha düşük dayanımlar elde edilmesine sebep olmaktadır. Eldeki veriler ışığında nülön ankrajların kiriş eğilme güçlendirmelerinde ankrajlama amaçlı kullanılmaları sakıncalıdır.
9. Ucu gömme şerit bantların LP bulonlara göre daha etkin olabileceği gözlemlenmiştir. Ancak istenen göçme halinin elde edilemeyeşinden ötürü kesin bir yargıya vararak tasarım için herhangi bir öneri getirmek şu an için mümkün değildir.

5.2 İleriye Yönelik Önerilen Potansiyel Araştırma Alanları

Çalışmanın sonuçları ışığında aşağıdaki konuların ileriki araştırmalarında incelenmesi gereken konular olduğunun tespiti mümkündür. Bu konular;

1. Ankraj dayanımlarının yükleme koşullarına göre nasıl etkilendiği, (örneğin tersinir yüklemenin ayrışma kapasitesini ne ölçüde değiştireceği)
2. Bu araştırma sonucunda belirlenen ankraj modeline göre tasarlanmış LP'lerin yapı elemanlarındaki performansı, (örneğin Deprem Şartnamesinde yer alan LP ile dolgu duvar güçlendirmesi metodu için)
3. LP ayrışması gözlenen kirişlerde bulon ankrajların nasıl kullanılması gerektiği ve bu kullanımla nasıl gerilme yığılmalarının engellenebileceği,
4. Ayrışmanın eğilme durumu için hangi ankraj kapasitelerinde meydana geldiğinin tespit edilmesi (örneğin kiriş kesme güçlendirmeleri için),
5. LP yapıştırması sırasında işçiliğin kapasiteyi ne oranda etkilediği ve düzgün kalite kontrol metodlarının geliştirilmesi

şeklinde sıralanabilir.

Ek-1 Ankraj dayanım diferensiyal denkleminin çıkarımı

Şekil 3.1’de verilen sivali kesit kullanılarak sıva ve yapıştırıcı için denge denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\left((\sigma_{frp} + d\sigma_{frp}) - \sigma_{frp} \right) t_{frp} b_{frp} - \tau b_{frp} dx = 0 \quad (A.1a)$$

$$(\sigma_c + d\sigma_c) - \sigma_c t_c b_c + \tau b_{frp} dx = 0 \quad (A.1b)$$

Denklemler A.2a ve A.2b, Denklemler A.1a ve A.1b’den elde edilebilir.

$$\frac{d\sigma_{frp}}{dx} - \frac{\tau}{t_{frp}} = 0 \quad (A.2a)$$

$$\frac{d\sigma_c}{dx} \frac{b_c}{b_{frp}} + \frac{\tau}{t_c} = 0 \quad (A.2b)$$

Beton blokları ve KLP’leri lineer elastik kabul edilerek, gerilimler Denklemler A.3a ve A.3b’de olduğu gibi yazabilir.

$$\sigma_{frp} = E_{frp} \frac{du_{frp}}{dx} \quad (A.3a)$$

$$\sigma_c = E_c \frac{du_c}{dx} \quad (A.3b)$$

Denklem A.4, Denklemler A.2a ve A.2b yardımı ile elde edilebilir

$$-\frac{d\sigma_{frp}}{dx} \frac{t_{frp} b_{frp}}{t_c b_c} = \frac{d\sigma_c}{dx} \quad (A.4)$$

Toplam kayma deplasmanı, δ , Şekil 3.1’de verilmiştir.

$$\delta = u_{frp} - u_c \quad (A.5)$$

İki tarafında diferansiyeli alındığında:

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{d^2u_{frp}}{dx^2} - \frac{d^2u_c}{dx^2} \quad (A.6)$$

Denklemler A.3a ve A.3b’in diferansiyeli alınıp, Denklem A.6’da yerine konulduğunda Denklem A.7 elde edilebilir:

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{1}{E_{frp}} \frac{d\sigma_{frp}}{dx} - \frac{1}{E_c} \frac{d\sigma_c}{dx} \quad (A.7)$$

Denklem A.4, Denklem A.7’de yerine konulduğunda Denklem A.8 elde edilebilir.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{d\sigma_{frp}}{dx} \left(\frac{1}{E_{frp}} + \frac{t_{frp} b_{frp}}{E_c t_c b_c} \right) \quad (A.8)$$

Problem ana ifadesi Denklem A.2, Denklem A.8’de yerine konulduğunda elde edilebilir.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \tau \left(\frac{1}{E_{frp} t_{frp}} + \frac{b_{frp}}{E_c t_c b_c} \right) \quad (A.9)$$

Beton blokların rijitliklerinin KLP’e kıyasla çok büyük olduğu kabul edilip, ikinci terim ihmal edilirse Denklem A.10’da ana ifade elde edilebilir.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \tau \left(\frac{1}{E_{frp} t_{frp}} \right) \quad (A.10)$$

EK-2 Kaynaklar

1. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. (2006) Pp: 159.
2. CHAJES, M. J., Finch, W. W., Januzska, T. F., ve Thomson, T. A. *Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete*. ACI, Struct. J, 93(2), (1993), Pp:208-217.
3. TALJSTEN B. *Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete*. Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol 17, (1997),Pp:319-327.
4. YAO, J., Teng, J.G. ve Chen, J.F. *Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints*. Composites Part B: Engineering, 36, (2005),99-113,.
5. CHEN, J.F. ve Teng, J.G. *Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete*. ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.127, No.7, (2001),Pp:784-791.
6. DAI J., Sato Y., Ueda T. *Improving the load transfer and effective bond length for FRP composites bonded to concrete*. Proc. of Japan Concrete Institute, 24, (1997),Pp:1423-1428..
7. BİNİCİ B. ve Bayrak, O. *Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete*. 11th US-Japan Conference on Composite Materials, Yamagata University, Yonezawa, Yamagata, Japan, September 9-11 (2004).
8. DE LORENZIS L., Miller B. ve Nanni A. *Bond of FRP Laminates to Concrete*. ACI, Materials J. 98(3), (2001), Pp: 256-264.
9. OZDEMİR, G. *Mechanical Properties of CFRP Anchorages*. Master of Sciences Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University (2005).
10. KOBAYASHI, K., Fujii, S., Yabe, Y., Tsukagoshi, H. ve Sugiyama, T. *Advanced Wrapping System with CF-Anchor Transfer Mechanism of CF-Anchor*. FRPRSC-5 Conference, Cambridge, (2000).
11. DAI, J., Ueda, T. ve Sato Y. *Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method*. ASCE, Journal of Composites for Construction, Vol.9, No.1, (2005), Pp: 52-62.
12. NABAKA K., Kanakubo T., Furuta T., ve Yoshizawa H. *Bond Behavior Between FRP Laminates and Concrete*. ACI, Struct. J., 98(3), (2001),Pp:359-367.
13. LU, X.Z., Teng J.G., Ye, L.P., ve Jiang, J.J. *Bond-Slip models for FRP Sheets/ Plates Bonded to Concrete*. Engineering Structures, 27,Pp:920–937, (2005).
14. MALEK, A.M., Saadatmanesh, H., ve Ehsani, M.R., *Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened With FRP Plates Due to the Stress Concentration at the Plate End*. ACI, Struct. J. 95(1), (1998), Pp:142-152.
15. BROSENS, K., ve Gemert, D. V. *Anchoring Stresses Between Concrete and Carbon Fibre Reinforced Laminates* Proc. 3rd Inter. Symp. Non-Metallic (FRP) Reinforcements for Concrete Structures, (1997).

16. WU, Z., Yuan, H., Niu, H., Stress Transfer and Fracture Propagation in Different Kinds of Adhesive Joints", ASCE, J. of Eng. Mec., Vol.128, No.5, (2002), Pp: 562-573.
17. YUAN H, Teng JG, Seracino R, Wu ZS, ve Yao J., *Full-range Behavior of FRP-to-Concrete Bonded Joints*. Engineering Structures, 26(5), (2004), Pp:553–564,.
18. MAEDA T., Asano Y., Ueda T., ve Kakuta Y. *A study on bond mechanism of carbon fiber sheet*. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Proceedings of Third International Symposium, Sapporo, Japan, (1997), Pp:279–285.
19. UEDA T., Sato Y., ve Asano Y. *Experimental study on bond strength of continuous carbon fiber sheet*. Proc. 4th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer for RC Structures, ACI, Detroit, Mich., (1999), Pp:407-416.
20. NEUBAUER U ve Rostásy F. S., *Bond Failure of Concrete Fiber Reinforced Polymer Plates at Inclined Cracks-Experiments and Fracture Mechanics Model*, 4th Inter. Symp. FRP Reinforcement for RC Structures, (1999).
21. HOLZENKÄMPFER O., *Ingenieurmodelle des verbudes geklebter bewehrung für betonbauteile*. Dissertation TU Braunschweig, Germany, (1994).
22. DOLAN, B., Hamilton, H.R., ve Dolan, C. *Strengthening with FRP Lamina*. ACI, Concrete International, Vol. 20, No.6, (1998), Pp.51-56.
23. SAVIOA M., Farracuti B., ve Mazzottti D., *Non-Linear Bond-Slip for FRP Concrete Interface*. Proc. of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures., Singapore, World Scientific Publications, (2003), Pp:183-192,.
24. REN H.T. *Study on Basic Theories and Long Time Behavior of Concrete Structures Strengthened with Reinforced Polymers*. Dissertaion, Dalian University of Technology, China , (2003).
25. SMITH S.T. ve Teng, J.G. *FRP-Strengthened RC Beams. 1: review of debonding strength models*. Engineering Structures, Vol. 24, (2002) Pp:385-395.